

Bestimmung der GURNEY-Energien und JWL-Parameter zivil genutzter Sprengstoffe mittels Zylindertestverfahren

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigte Dissertation

von
Diplom-Chemikerin
Christine Zimbal
aus Berlin

- 1. Gutachter: Prof. Dr. W. Spyra
- 2. Gutachter: Prof. Dr. K. Ziegler
- 3. Gutachter: Prof. Dr. W. Witt

Tag der mündlichen Prüfung: 09.07.2014

Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eidesstatt, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne weitere als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen erstellt zu haben.

Eine Plagiatsprüfung wurde mit Hilfe der Software "PlagAware" (www.plagaware.de) durchgeführt.

Vorwort

Diese Arbeit ist in der Zeit von Oktober 2008 bis Juni 2012 an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), im Fachbereich 2.3 - Explosivstoffe, entstanden und wurde in der Zeit von Januar bis April 2013 überarbeitet. Die universitäre Betreuung erfolgte durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Spyra von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Ohne die Hilfe vieler helfender Hände und inspirierender Köpfe hätte diese Arbeit nicht entstehen können.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Spyra, BTU Cottbus, der nach langer Suche den wissenschaftlichen Schirm aufspannte und mir durch zahlreiche Anregungen den Abschluss dieser Arbeit ermöglichte.

Ebenso sehr möchte ich Prof. Dr.-Ing. Kurt Ziegler, TU Berlin, danken, der sich die Zeit nahm, um diese Arbeit zu begutachten und Anregungen zu Verbesserungsmöglichkeiten gab.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Witt, BTU Cottbus, der sich kurzfristig als Gutachter zur Verfügung stellte.

Ich danke weiterhin Frau Dr. Moana Nolde, BAM Berlin, für die spontane Überlassung dieses interessanten Themas und für die Betreuung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Besonders dankbar bin ich auch Herrn Dr. Holger Krebs für die zahlreichen Gespräche, die mir den Weg wiesen, für die Geduld, die er mir entgegenbrachte, und für die aufmunternden Worte.

Weiterhin danke ich den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der BAM, die mir bei kleinen und größeren Problemen geholfen haben. Insbesondere danke ich Herrn Dietmar Näther für die handwerkliche Umsetzung spezieller Wünsche, Herrn Dr. Thomas Lehmann, der mich in zahllosen Gesprächen auf neue Ideen

brachte, Herrn Reinhold Wendler für die Bereitstellung und Bedienung der Messtechnik, Herrn Olaf Mücke für die Hilfestellung bei messtechnischen Problemen, Frau Cordelia Schmidt für die Durchführung chemischer Analysen, Herrn Maik Föllner für die Erstellung der Röntgenaufnahmen, Herrn Dr. Alexander von Oertzen, ohne den die Programmierung des Auswertungsprogrammes zu einer echten Qual geworden wäre, Diana Schäfer für die moralische Unterstützung, allen helfenden Händen bei der Durchführung der Versuche auf dem Testgelände Technische Sicherheit der BAM und allen anderen BAMologen, die mich in den letzten Jahren unterstützt haben.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Göder und Herrn Mann von der Firma Maxam Deutschland GmbH sowie Herrn Panchyrz von der Firma Eurodyn Sprengmittel GmbH für die Bereitstellung von Sprengstoffen. Herrn Schneider der Eurodyn Sprengmittel GmbH möchte ich außerdem für die Einführung in die Herstellung von Emulsionssprengstoffen im Labormaßstab danken. Auch Herrn Dr. Arnold, Herrn Dr. Graswald und Herrn Felbermeier der Firma MBDA-TDW danke ich für die Zusammenarbeit und die Möglichkeit der Durchführung von vergleichenden Versuchen.

Last but not least gilt ein besonderes "Miep" Frau Nicole Lehmann und Herrn Benjamin Theil. Sie haben mit mir nicht nur bei Wind und Wetter die Anstrengungen der Versuchsdurchführung geteilt, sondern mich auch immer unterstützt, mir Mut gemacht und die letzten Jahre zu einer unvergesslichen Zeit werden lassen.

I. Inhalt

I. Inhalt	i
II. Formelzeichen	iv
III. Abkürzungen	viii
IV. Abbildungen	ix
V. Tabellen	xiii
1. Einleitung und Motivation	1
2. Theoretische Grundlagen	7
2.1. Detonation und Detonationstheorie	7
2.1.1. Detonation.....	7
2.1.2. Hydrodynamische Detonationstheorie	8
2.2. GURNEY-Energie und Gurney-Modell.....	13
2.3. Zustandsgleichungen	20
2.3.1. JWL-Zustandsgleichung	21
2.4. Zylindertests	25
2.4.1. Aufnahmetechniken.....	27
2.4.2. Bestimmung der radialen Geschwindigkeit, der GURNEY- Energie und der GURNEY-Geschwindigkeit.....	29
2.4.3. Ermittlung der JWL-Parameter	34
2.4.3.1. Isentroper Druck der Zylinderexpansion.....	34
2.4.3.2. Isentrope innere Energie der Zylinderexpansion	35
2.4.3.3. "Partielles Fitting" der Druck-Volumen- bzw. Energie- Volumen-Kurven.....	38
2.5. Zivil genutzte Sprengstoffe	40
2.5.1. Auswahl der Sprengstoffe für die Zylindertests	43
3. Experimenteller Teil	47
3.1. Aufbau der Zylindertestversuche.....	47
3.1.1. Die Beleuchtung.....	51

3.2. Weiterführende Untersuchungen	53
3.2.1. Röntgenaufnahmen.....	53
3.2.2. Messung der Detonationsgeschwindigkeit	56
3.2.3. Splitterbild	59
4. Auswertung	70
4.1. GURNEY-Energie und GURNEY-Geschwindigkeit	70
4.1.1. Bestimmung der radialen Geschwindigkeiten der Zylinderwand	70
4.1.2. Bestimmung der GURNEY-Energien und GURNEY- Geschwindigkeiten	77
4.1.3. Vergleich der bildgebenden Aufnahmetechnik mit klassischer Streaktechnik.....	83
4.1.4. Einzelbildauswertung	84
4.1.5. Beurteilung der Messmethode	89
4.1.5.1. Genauigkeit der verwendeten Messmethode	93
4.2. JWL-Parameter	97
4.2.1. Ermittlung der JWL-Parameter durch "partielles Fitting"	99
4.2.2. Beurteilung des Verfahrens	105
4.2.2.1. Genauigkeit des Verfahrens	108
4.3. Diskussion.....	109
5. Zusammenfassung	113
6. Ausblick.....	118
7. Abstract	122
8. Literatur	124
9. Anhang	131
9.1. Versuchsübersicht	131
9.2. Radiale Ausdehnung	134
9.2.1. "Andex", Eurodyn Sprengmittel GmbH	135
9.2.2. "Wetter-Westfalit C", Maxam Deutschland GmbH	157
9.2.3. "Emulgit 42G", Maxam Deutschland GmbH.....	166

9.2.4. "Emu", <i>chemical gasing</i> , BAM.....	179
9.2.5. "Dumbo", Mikrohohlkörper, BAM	228
9.2.6. "TNT, geschuppt", ELOVITZA	234
9.2.7. "Supergel 30", Maxam Deutschland GmbH	240
9.2.8. "Testsprengstoff", MBDA-TDW	254
9.3. Selbstverfasste Skripte und Programme zur Erfassung der Zylindertestdaten	260
9.3.1. Skript zur Generierung von Streakbildern aus den Einzelbildern eines Filmes	260
9.3.2. Programm zur Bestimmung der seitlichen (radialen) Ausdehnung der Zylinderwand.....	261

II. Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	JWL-Parameter	[GPa], [Mbar]
A_r	Kurvenanpassungsparameter der Zylinderexpansion	[mm·μs ⁻¹]
B	JWL-Parameter	[GPa], [Mbar]
B_r	Kurvenanpassungsparameter der Zylinderexpansion	[μs ⁻¹]
C	JWL-Parameter	[GPa], [Mbar]
M_M	Masse des Metalls	[kg], [g]
M_C	Masse des Sprengstoffes	[kg], [g]
N_f	Anzahl der Risse	-
R	allgemeine Gaskonstante	[J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹]
R_1	JWL-Parameter	-
R_2	JWL-Parameter	-
S	Entropie	[J·K ⁻¹]
T	Temperatur	[K]
T_{Ex}	Theoretische Explosionstemperatur	[K]
V	Verhältnis der spezifischen Volumina	-
a	Beschleunigung der Zylinderwand	[mm·μs ⁻²]
a	Kohäsionsdruck	[Pa·m ⁶ ·mol ⁻²]
a_s	Schleuderweite	[m]
b	Co-Volumen	[m ² ·mol ⁻¹]
e	spezifische Energie	[kJ·kg ⁻¹]
$e_{B, \text{Explosivstoff}}$	Bildungsenergie der Sprengstoffbestandteile	[kJ·kg ⁻¹]
$e_{B, \text{Schwaden}}$	Bildungsenergie der Explosionsprodukte	[kJ·kg ⁻¹]
e_D	spezifische, dichtebezogene GURNEY-Energie	[MJ·m ⁻³]

Symbol	Bezeichnung	Einheit
e_F	kinetische Energie der Schwaden	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$
e_f	rissflächenbezogene Energie	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-2}]$
e_G	GURNEY-Energie	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
e_M	kinetische Energie der Zylinderwand	$[\text{kJ} \cdot \text{m}]$
e_S	isentropische, volumenspezifische innere Energie	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$
$e_{S, \text{bei } V=1}$	isentropische innere Energie bei einem Volumenverhältnis von $V=1$	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$
e_{tot}	totale kinetische Energie pro Masseneinheit des Explosivstoffes	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1}]$
e_V	volumenspezifische innere Energie der Detonationsprodukte	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$
$e_{V,0}$	volumenspezifische innere Energie der Explosivstoffe	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$
e_0	spezifische innere Energie des unreaktierten Explosivstoffes	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$
e_1	spezifische innere Energie der Detonationsprodukte	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$
g	Erdbeschleunigung	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
m_C	Masse des Sprengstoffes pro Längeneinheit	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}]$
m_M	Masse des Metalls pro Längeneinheit	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}]$
m_N	Masse einer weiteren Metallplatte pro Längeneinheit	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}]$
n	Geometriefaktor der GURNEY-Gleichung	-
n	Stoffmenge	$[\text{mol}]$
p	Druck	$[\text{Pa}], [\text{bar}]$
p_0	Ausgangsdruck	$[\text{Pa}]$
p_1	Detonationsdruck	$[\text{kPa}]$
p_{CJ}	CHAPMAN-JOUGUET-Druck	$[\text{kPa}]$
p_S	isentropischer Druck	$[\text{kPa}]$
q	Detonationswärme	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

Symbol	Bezeichnung	Einheit
q_s	spezifischer Sprengstoffbedarf	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
r	Radius	$[\text{mm}]$
r_a	äußerer Radius	$[\text{mm}]$
$r_{a,0}$	äußerer Radius im Ausgangszustand	$[\text{mm}]$
r_i	innerer Radius	$[\text{mm}]$
$r_{i,0}$	innerer Radius im Ausgangszustand	$[\text{mm}]$
r_m	mittlerer Radius	$[\text{mm}]$
$r_{m,0}$	mittlerer Radius im Ausgangszustand	$[\text{mm}]$
r_{max}	maximaler Radius	$[\text{mm}]$
t	Zeit	$[\mu\text{s}]$
t_0	Anfangszeit	$[\mu\text{s}]$
t_{exp}	Zeit während der Expansion	$[\mu\text{s}]$
$v_{C,CJ}$	Schallgeschwindigkeit am CJ-Punkt	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_D	Detonationsgeschwindigkeit	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$, $[\text{km} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v_{D,CJ}$	Detonationsgeschwindigkeit am CJ-Punkt	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_G	GURNEY-Geschwindigkeit / GURNEY-Konstante	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$, $[\text{km} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_L	radiale Expansionsgeschwindigkeit der Zylinderwand, nach Expansionswinkelkorrektur	$[\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}]$
$v_{L,max}$	radiale Endgeschwindigkeit der Zylinderwand, nach Expansionswinkelkorrektur	$[\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}]$
v_M	Geschwindigkeit der Metallplatte	$[\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}]$
v_m	radiale Expansionsgeschwindigkeit der Zylinderwand	$[\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}]$
v_W	Geschwindigkeit der Detonationsprodukte	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$v_{W,CJ}$	Schwadengeschwindigkeit am CJ-Punkt	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_0	Anfangsgeschwindigkeit der Fragmente	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

Symbol	Bezeichnung	Einheit
Γ	GRÜNEISEN-Parameter	-
Δe_G	GURNEY-Energie-Fehler	[MJ·kg ⁻¹]
Δm	Waagenfehler	[kg]
Δr_m	Änderung des mittleren Radius	[mm]
Δr	Fehler der radialen Ausdehnung	[mm]
Δt	Zeitfehler	[μs]
Δv_m	Fehler der radialen Endgeschwindigkeit	[mm·μs ⁻¹]
Θ	Expansionswinkel	-
γ	Polytropenexponent	-
η	Verhältnis zwischen Schwaden- und Sprengstoffdichte	-
v	spezifisches Volumen	[m ³ ·kg ⁻¹]
v_0	spezifisches Sprengstoffvolumen	[m ³ ·kg ⁻¹]
v_{CJ}	spezifisches CHAPMAN-JOUGUET-Volumen	[m ³ ·kg ⁻¹]
v_i	spezifisches Expansionsvolumen	[m ³ ·kg ⁻¹]
ρ	Dichte	[kg·m ⁻³]
ρ_i	Dichte der Detonationsprodukte bei einem inneren Radius r_i	[kg·m ⁻³]
ρ_0	Dichte des Sprengstoffes	[kg·m ⁻³], [g·cm ⁻³]
ρ_s	Gesteinsdichte	[kg·m ⁻³]
ω	JWL-Parameter	-

III. Abkürzungen

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
bsp.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
CJ	CHAPMAN JOUGUET (<i>-Punkt/ -Ebene</i>)
d. h.	das heißt
<i>et al.</i>	<i>et alii</i> (und andere)
<i>etc.</i>	<i>et cetera</i> (und so weiter)
g	Gramm
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPa	Gigapascal
i. d. R.	in der Regel
JWL	JONES WILKINS LEE (<i>-Zustandsgleichung/ -Parameter</i>)
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
km	Kilometer
m	Meter
Mbar	Megabar
MJ	Megajoule
µm	Mikrometer
µs	Mikrosekunde
mm	Millimeter
Pa	Pascal
s	Sekunde
TNT	Trinitrotoluol
u. a.	und andere
u. a.	unter anderem
z. B.	zum Beispiel

IV. Abbildungen

Abbildung 1.1: Vergleich von Experiment und Simulation des Druckverlaufes in der Umgebung einer Detonation. (NOLDE 2009)	3
Abbildung 2.1.1: Schematische Darstellung der Entstehung einer ebenen Stoßwelle. (nach KÖHLER und MEYER 1998, LEE 1998, u. a.)	9
Abbildung 2.1.2: Zustandsdiagramm mit HUGONIOT-Kurve und RAYLEIGH- Gerade. (nach KÖHLER und MEYER 1998, K LAPÖTKE 2009, LEE 1998)	11
Abbildung 2.1.3: Schematische Darstellung der Detonationswelle. (nach KÖHLER und MEYER 1998, K LAPÖTKE 2009, LEE 1998)	12
Abbildung 2.2.1: Geometrieformen des GURNEY-Modells. (nach KENNEDY 1998)	17
Abbildung 2.4.1: Schematische Darstellung der Rohraufweitung während eines Zylindertests.	26
Abbildung 2.4.2: Streakaufnahme mit einer Drehspiegelkamera eines militärischen Sprengstoffes, MBDA-TDW. (ARNOLD 2011)	27
Abbildung 2.4.3: Schematischer Aufbau von Zylinderexpansionsversuchen mit Kontaktpins zur Aufzeichnung der Expansion. (OUCHTERLONY et al. 2003)	28
Abbildung 2.4.4: Zusammengesetzte Streakansicht aus einem Zylindertest eines gelatinösen Sprengstoffes. (BAM)	29
Abbildung 2.4.5: Schematische Darstellung der Radien eines expandierenden Zylinders	30
Abbildung 2.4.6: Expansion der Zylinderwand, (nach KENNEDY 1998)	32
Abbildung 2.4.7 : Schematischer Zusammenhang zwischen den Zylindertestdaten und der GURNEY-Energie und -Geschwindigkeit	33
Abbildung 2.4.8 : Schematische Darstellung des Zusammenhangs der aus den Zylindertests gewonnenen Daten und der JWL-Parameter	40
Abbildung 3.1.1: Schematischer Aufbau eines Zylinderrohrtests	47
Abbildung 3.1.2: Aufbau eines Zylinderrohrtests (von vorne)	48
Abbildung 3.1.3: Aufbau eines Zylinderrohrtests (von hinten)	48

Abbildung 3.2.1: Röntgenaufnahme eines mit einer BAM-Emulsion ("Emu") gefüllten Kupferrohres.(BAM)	54
Abbildung 3.2.2: Röntgenaufnahme eines mit "Supergel 30" gefüllten Kupferrohres. (BAM)	54
Abbildung 3.2.3: Röntgenaufnahme eines mit "Andex" gefüllten Kupferrohres. (BAM)	54
Abbildung 3.2.4: Röntgenaufnahme eines mit "Emulgit 42G" gefüllten Kupferrohres. (BAM)	55
Abbildung 3.2.5: "Emulgit 42G" im Kupferrohrzylinder.	55
Abbildung 3.2.6: Kurzschlusssonde zur Messung der Detonationsgeschwindigkeit.	56
Abbildung 3.2.7 und 3.2.8: Detailaufnahmen der Sondenfertigung.	57
Abbildung 3.2.9: Weg-Zeit-Diagramm einer Geschwindigkeitsmessung von "Wetter-Westfalit C".	58
Abbildung 3.2.10: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem ANFO-Sprengstoff "Andex".....	61
Abbildung 3.2.11: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem Emulsionssprengstoff "Emu" mit einer Dichte von 1,02 g/cm ³	62
Abbildung 3.2.12: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem Emulsionssprengstoff "Emu" mit einer Dichte von 1,13 g/cm ³	62
Abbildung 3.2.13: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem Emulsionssprengstoff "Dumbo".....	63
Abbildung 3.2.14: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem Emulsionssprengstoff "Emulgit 42G".....	63
Abbildung 3.2.15: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit TNT.	64
Abbildung 3.2.16: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit einem gelatinösen Sprengstoffes.	65
Abbildung 3.2.17: Charakteristische Splitter eines Wettersprengstoffes.	66
Abbildung 3.2.18: Detailaufnahme eines Splitters vom Zylindertest mit einem Wettersprengstoff.	67
Abbildung 3.2.19: Detailaufnahme eines Splitters vom Zylindertest mit TNT.	67

Abbildungen 4.1.1, 4.1.2 und 4.1.3: Generierte Streakansichten aus einer Aufnahme eines Zylindertests von ANFO-Sprengstoff. Die Streakansichten stammen aus einem Film, wurden aber in unterschiedlichen Höhen des Zylinders generiert.	71
Abbildung 4.1.4: Zeitlicher Verlauf der radialen Ausdehnung der Kupferwand während eines Zylindertests von "Andex".	72
Abbildung 4.1.5: Zeitlicher Verlauf der radialen Geschwindigkeit der Kupferwand während eines Zylindertests von "Andex".	73
Abbildung 4.1.6: Zeitlicher Verlauf der radialen Beschleunigung der Kupferwand während eines Zylindertests von "Andex".	74
Abbildung 4.1.7: Darstellung der radialen Ausdehnung der Kupferrohrwand als Funktion der Zeit.	75
Abbildung 4.1.8: Darstellung der radialen Geschwindigkeiten der Kupferrohrwand in Abhängigkeit der Zeit.	76
Abbildung 4.1.9: Darstellung der Radialgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Detonationsgeschwindigkeit.	77
Abbildung 4.1.10: GURNEY-Energien e_G in Abhängigkeit des Volumenverhältnisses V	78
Abbildung 4.1.11: GURNEY-Energien und Detonationsgeschwindigkeiten selbst hergestellter Emulsionssprengstoffe in Abhängigkeit von deren Dichte im Ausgangszustand.	80
Abbildung 4.1.12: Verhältnis von Detonationsgeschwindigkeit zur GURNEY-Energie in Abhängigkeit der Detonationsgeschwindigkeit	83
Abbildung 4.1.13: Einzelaufnahme eines Zylindertests mit ANFO-Sprengstoff, Bild um 180° gedreht.	85
Abbildung 4.1.14: Radiale Ausdehnung als Funktion der Zeit (Einzelauswertung eines ANFO-Sprengstoffes).	86
Abbildung 4.1.15: Radiale Geschwindigkeiten von Einzelaufnahme- und Streakauswertung.	88
Abbildung 4.1.16: Einzelbild aus einer Zylindertestaufnahme eines Emulsionssprengstoffes. Die schwarzen Linien rechts und links vom aufgeweiteten Rohr sind die Beine der Haltevorrichtung.	90

Abbildung 4.1.17, 4.1.18 und 4.1.19: Einzelbilder aus einem Zylindertest des Emulsionssprengstoffs "Dumbo".	91
Abbildung 4.1.20: Ausschnitt aus einer Röntgen-Aufnahme eines mit "Emulgit 42G" gefüllten Kupferrohres.	92
Abbildung 4.1.21: Draufsicht auf das mit "Emulgit 42G" gefüllte Kupferrohr.	92
Abbildung 4.1.22: Radiale Ausdehnung der Kupferwand in unterschiedlichen Höhen bei einem Versuch mit "Emulgit 42G".	92
Abbildung 4.1.23: Darstellung des relativen Fehlers der gemessenen radialen Endgeschwindigkeit in Abhängigkeit der ermittelten maximalen radialen Ausdehnung	95
Abbildung 4.1.24 : Darstellung des relativen Fehlers der bestimmten Gurney-Energie in Abhängigkeit der ermittelten maximalen radialen Ausdehnung	96
Abbildung 4.2.1: Energie-Volumen-Kurve eines Emulsionssprengstoffes.	100
Abbildung 4.2.2: Erste Fitting-Analyse zur Bestimmung der Parameter C und ω am Beispiel eines Emulsionssprengstoffes.	101
Abbildung 4.2.3: Zweite Fitting-Analyse zur Bestimmung der Parameter B und R_2 am Beispiel eines Emulsionssprengstoffes.	102
Abbildung 4.2.4: Dritte Fitting-Analyse zur Bestimmung der Parameter A und R_1 am Beispiel eines Emulsionssprengstoffes.	103
Abbildung 4.2.5: Darstellung der isentropen Energie in Abhängigkeit vom Volumenverhältnis aus den Zylindertestdaten (durchgezogene Linie) und mit Hilfe der JWL-Parameter berechnet (gestrichelte Linie).	105
Abbildung 4.3.1: Radiale Expansionsgeschwindigkeit von "Andex", aufgezeichnet in einem Abstand von ca. 60 m zur Kamera	110
Abbildung 4.3.2: Radiale Expansionsgeschwindigkeit von "Andex", aufgezeichnet in einem Abstand von ca. 17 m zur Kamera	110
Abbildung 5.1: Schematischer Überblick über den Zusammenhang der durch Zylindertests erhaltenen Diagrammdaten.	114

V. Tabellen

Tabelle 2.1: Beispiele für Detonationsgeschwindigkeit, GURNEY-Geschwindigkeit und deren Verhältnis	19
Tabelle 2.2: Überblick über die untersuchten Sprengstoffe	46
Tabelle 3.1: mittlere Detonationsgeschwindigkeiten der einzelnen Sprengstoffe im Zylinderrohrtest	59
Tabelle 3.2: Überblick über die durchschnittliche Splittergrößen bei den Zylinderexpansionsversuchen sowie die ermittelten Detonationsgeschwindigkeiten und GURNEY-Energien	68
Tabelle 4.1: Detonationsgeschwindigkeit, radiale Geschwindigkeit, GURNEY-Energie und -Geschwindigkeit, Verhältnis der Detonations- und GURNEY-Geschwindigkeit der untersuchten Sprengstoffe.	79
Tabelle 4.2: Detonationsgeschwindigkeit, GURNEY-Geschwindigkeit und deren Verhältnis von den untersuchten Sprengstoffen.	82
Tabelle 4.3: Vergleich der radialen Expansionsgeschwindigkeit, der GURNEY-Energie und der GURNEY-Geschwindigkeit eines Testsprengstoffes der Firma MBDA-TDW, aufgenommen mit einer Ultra-Highspeedkamera und einer Drehspiegel-Streakkamera	84
Tabelle 4.4: Gegenüberstellung der GURNEY-Energien aus der Einzelbild- und der Streakauswertung. (*Bestimmung der Zeitachse mittels Detonationsgeschwindigkeit des jeweiligen Rohres.)	87
Tabelle 4.5: JWL-Parameter der untersuchten Sprengstoffe	104
Tabelle 4.6: Gegenüberstellung der Literaturangaben der JWL-Parameter für TNT und ANFO mit den hier ermittelten Parametern (grau hinterlegt).	106
Tabelle 9.1: Überblick über die durchgeführten Zylindertestversuche, nach Sprengstoffen sortiert	131
Tabelle 9.2: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Andex"	155
Tabelle 9.3: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Wetter-Westfalit C"	165

Tabelle 9.4: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Emulgit 42G"	178
Tabelle 9.5: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Emu"	224
Tabelle 9.6: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Dumbo"	233
Tabelle 9.7: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von TNT	239
Tabelle 9.8: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Supergel 30" ..	252
Tabelle 9.9: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests des Testsprengstoffes	259

1. Einleitung und Motivation

Seit der Entdeckung des Schwarzpulvers im späten Mittelalter werden Sprengstoffe sowohl im militärischen als auch im zivilen Sektor verwendet. Im Laufe der Zeit wurden immer leistungsfähigere und handhabungssicherere Sprengstoffe entwickelt. Auch heute noch sind Sprengstoffe unerlässlich für zahlreiche Anwendungsbereiche. Zivil genutzte Sprengstoffe kommen z. B. im Berg- und Tunnelbau, bei Gewinnungssprengungen und Abrissarbeiten, beim Sprengplattinieren und für Schockwellensynthesen, ja sogar zur künstlerischen Gestaltung zum Einsatz.

Die verschiedenen Sprengstofftypen unterscheiden sich z. B. in ihrer Zusammensetzung, ihrer Detonationsgeschwindigkeit, ihrer Brisanz oder dem entstehenden Schwadenvolumen. Aufgrund dieser Vielfältigkeit der chemischen und physikalischen Eigenschaften können Sprengstoffe für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche eingesetzt werden. Während hochbrisante, schnell detonierende Sprengstoffe beispielsweise in Zündern zur Initiierung von Sprengladungen oder in Schneidladungen zur Durchtrennung von Metallträgern zum Einsatz kommen, werden Sprengstoffe, die ein hohes Schwadenvolumen entwickeln, z. B. in Steinbrüchen oder Bergwerken zu Gewinnungssprengungen eingesetzt. Diese sogenannten Gesteinssprengstoffe sind Gegenstand der Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit.

Bislang wurden zur Charakterisierung zivil genutzter Sprengstoffe die chemische Zusammensetzung vor und nach einer Detonation sowie die physikalischen Eigenschaften, wie z. B. die Detonationsgeschwindigkeit oder der Stoßwellendruck, betrachtet. Diese Informationen geben jedoch keine Auskunft über die Energieübertragung des Sprengstoffes und lassen deshalb keine Aussage über die Dynamik bzw. das Arbeitsvermögen des Sprengstoffes zu.

Eine im militärischen Bereich häufig ermittelte Größe, die die Leistungsfähigkeit eines Sprengstoffes widerspiegelt, ist die sogenannte GURNEY-Energie. (CATANACH *et al.* 1999, HORNBERG 1986 u. a.) Es handelt sich dabei um eine

sprengstoffspezifische kinetische Energie. Sie wird im militärischen Bereich untersucht, um die zur Verfügung stehende Energie zum Zeitpunkt der Fragmentierung der Metallhülle von Bomben und Granaten zu ermitteln. (GURNEY 1943) Dieser Aspekt spielt bei zivil genutzten Sprengstoffen keine Rolle, aber es gibt Überlegungen, die Aussagen der GURNEY-Energie über das Arbeitsvermögen eines Sprengstoffes auch auf zivil genutzte Sprengstoffe zu übertragen. (OUCHTERLONY *et al.* 2003, 2005) Die GURNEY-Energie ist eine sprengstoffspezifische Kenngröße, die Aussagen über die zur Verfügung stehende Energie zulässt und somit eine vergleichende Charakterisierung des Gesteinssprengstoffes hinsichtlich seiner Arbeitsleistung beispielsweise bei Gewinnungssprengungen ermöglicht. Des Weiteren ließen sich z. B. die Anfangsgeschwindigkeit und die maximale Schleuderweite von Gesteinsbrocken unter idealisierten Bedingungen bei Gewinnungssprengungen im Steinbruch abschätzen. (ROTH 1983) Auch die Energieübertragung bei der Schockwellensynthese, also bei der Herstellung chemischer Verbindungen unter Einfluß einer Stoßwelle, lässt sich mit Hilfe der GURNEY-Energie ermitteln. (SCHLOTAUER 2010, 2012)

Im zivilen Sektor sind bislang nur wenige Sprengstoffe hinsichtlich ihrer GURNEY-Energie untersucht worden. (OUCHTERLONY *et al.* 2003, 2005; HORNBERG 1986)

Das erste Ziel dieser Arbeit soll deshalb die Bestimmung der GURNEY-Energien verschiedener Vertreter zivil genutzter Sprengstoffe sein.

Zusätzlich zu experimentellen Untersuchungen haben Simulationsrechnungen zur Darstellung dynamischer Prozesse in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen.

Um Detonationswirkungen numerisch zu simulieren, wird für jeden involvierten Stoff (Luft, Beton, Explosivstoff etc.) eine Zustandsgleichung benötigt, die das Verhalten der Zustandsgrößen des Stoffes während eines dynamischen Prozesses beschreibt. Eine weitverbreitete Zustandsgleichung für Explosivstoffe ist die Zustandsgleichung nach JONES, WILKINS und LEE (JWL-Zustandsgleichung). Diese Zustandsgleichung ist Bestandteil mehrerer

Computer-Codes zur Simulation von Druckverläufen in der Umgebung von Explosionen.

Abbildung 1.1. zeigt die Simulation eines Druckverlaufes während einer Detonation im Vergleich zu experimentell erworbenen Daten bei gleicher Geometrie. Die Simulation wurde mit dem weitverbreiteten Programmpaket AUTODYNTM der Firma ANSYS durchgeführt. (NOLDE 2008, 2009)

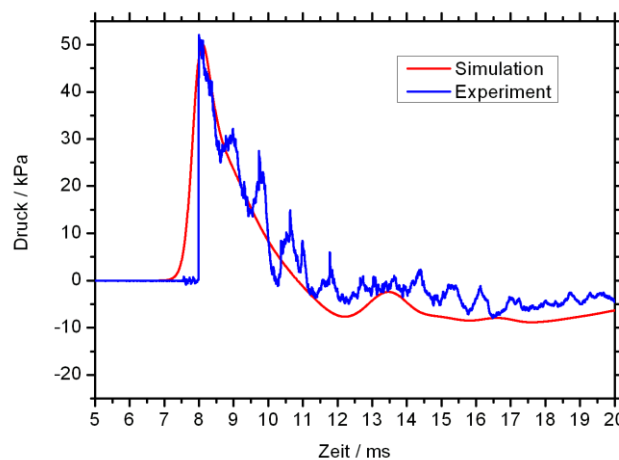


Abbildung 1.1: Vergleich von Experiment und Simulation des Druckverlaufes in der Umgebung einer Detonation. (NOLDE 2009)

Wie in der Abbildung deutlich wird, ist mit Hilfe dieses Programmpaketes eine realitätsnahe Darstellung des Druckverlaufes möglich. Die Kalibrierung solcher Simulationen erfolgt durch experimentell erworbene Daten bei gleicher Geometrie. So finden in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) beispielsweise Versuche statt, bei denen Bauelemente einer Detonationswirkung ausgesetzt werden. An bestimmten Stellen dieser Bauelemente wird der durch die Stoßwelle verursachte Druck gemessen. Der gleiche Aufbau wird dann numerisch simuliert und die Drücke an den entsprechenden Stellen verglichen. Durch Variation der Randbedingungen ist es möglich, gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Realität zu gewinnen.

Bestandteil des Simulationsprogramms ist eine Materialdatenbank, die die für eine Simulation benötigten Parameter einer Vielzahl üblicher Stoffe - wie z. B. verschiedener Metalle, diverser Baustoffe oder auch unterschiedlicher Explosivstoffe - enthält. Dort finden sich zwar eine Reihe militärischer Sprengstoffe, zivil genutzte Explosivstoffe sind in der Datenbank jedoch nicht zu finden. Bisher wurde sich bei der Simulation von Explosionsprozessen ziviler Sprengstoffe damit beholfen, TNT-Äquivalente zu verwenden, da TNT hinsichtlich seiner JWL-Parameter ausgiebig untersucht wurde (HORNBERG und VOLK 1989, u. a.). Daher wurden auch für die zivil genutzten Sprengstoffe die Parameter für TNT in die Simulationsrechnung eingesetzt. Hierbei muss aber unterschieden werden, auf welche Wirkung sich die Äquivalentangabe bezieht. So kann zwischen dem energetischen, dem Druck- und dem Impulsäquivalent unterschieden werden. Hier findet sich in der Literatur meist nur der Wert, der sich auf das energetische TNT-Äquivalent bezieht.

Um die Möglichkeiten der Simulation besser ausnutzen zu können, ist die Kenntnis der Parameter der JONES-WILKINS-LEE-Zustandsgleichung des eingesetzten Sprengstoffes nötig. Durch Kenntnis dieser sprengstoffspezifischen Parameter ließen sich die Simulationen mit wesentlich größerer Effizienz und Genauigkeit durchführen. So könnte z. B. die sicherheitstechnische Auslegung eines Sprengstofflagers - sowohl über- als auch untertage - optimiert werden, und die Anzahl umfangreicher und damit teurer Sprengversuche verringert werden. Die in der Zweiten Verordnung zum Sprengstoffgesetz der Bundesrepublik Deutschland genannten Sicherheitsabstände beruhen auf empirisch ermittelten und durch Abschätzung gewonnenen Erfahrungswerten. (2. SprengV zum SprengG 2010)

Wäre es möglich, Simulationen der Detonationswirkung einzelner Explosivstoffe sprengstoffspezifisch durchzuführen, könnten die Sicherheitsabstände sowie die bauliche Anlage des Lagers selbst und die umgebenden Gebäude den gegebenen Situationen entsprechend optimiert werden. Gleiches gilt auch für Produktionsstätten und Versuchslaboratorien, in denen mit explosionsgefährlichen Stoffen gearbeitet wird. Die sicherheitstechnischen Kenndaten in der Unfallverhütungsvorschrift der Berufsgenossenschaft zur

baulichen Anordnung und zu Sicherheitsabständen beim Umgang mit Explosivstoffen könnten durch genauere, sprengstoffspezifische Simulationen überprüft und ggf. optimiert werden. (BGV B5, Anlage 2) In der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung sind entsprechende Simulationen geplant.

Auch die bauliche Beschaffenheit von Gebäuden und Gebäudeteilen könnte hinsichtlich ihrer Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Sprengstoffen durch entsprechende Simulationen überprüft werden. Dadurch könnte die Gefahrenabwehr gefährdeter Gebäude verbessert werden.

Durch sprengstoffspezifische Simulationen ließe sich auch der Unfallhergang bei der Untersuchung von Unfällen mit Explosivstoff genauer darstellen. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse können der Verbesserung von Unfallverhütungsmaßnahmen dienen.

Um diese Simulationsdarstellungen sprengstoffspezifisch ausführen zu können, werden die entsprechenden Parameter der Zustandsgleichung für den jeweiligen Sprengstoff benötigt. Die Bestimmung dieser JWL-Parameter für verschiedene zivil genutzte Sprengstoffe soll das zweite Ziel dieser Arbeit sein.

Die sprengstoffspezifischen GURNEY-Energien und JWL-Parameter lassen sich mit Hilfe eines so genannten Zylindertests ermitteln. Für militärische Sprengstoffe hat sich der Zylindertest, auch als Zylinderrohrtest oder Zylinderexpansionstest bezeichnet, bereits etabliert. (CATANACH *et al.* 1999, HORNBERG 1986 u. a.) Dabei wird der Sprengstoff in ein Kupferrohr gefüllt und an einem Rohrende initiiert. Die radiale Ausdehnung der Kupferrohrwand wird während der Detonation aufgezeichnet.

Die GURNEY-Energien lassen sich mit Hilfe der ermittelten Radialgeschwindigkeit berechnen. Für die Bestimmung der JWL-Parameter kommt ein Verfahren zum Einsatz, welches die Ermittlung der einzelnen Parameter aus den mit Hilfe der Daten der Zylinderexpansion erhaltenen Energiekurven durch verschiedene Regressionsfunktionen ermöglicht.

Bisher wurden Zylindertests überwiegend mit der sogenannten Streakaufnahmetechnik durchgeführt. Dabei wird nur ein schmaler Streifen ($< 1\text{ mm}$) des Zylinders senkrecht zur Zylinderachse betrachtet. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Zylindertests soll ein bildgebendes Aufnahmeverfahren mit einer Ultra-Highspeedkamera zum Einsatz kommen. Dies ermöglicht eine Aufnahme von etwa 20 cm des Rohres und erlaubt so, den Verlauf der Expansion über einen größeren Bereich zu verfolgen. Zur Bestimmung der radialen Expansion des Kupferzylinders sollen zwei Verfahren angewendet werden. Zunächst soll die radiale Ausdehnung innerhalb einer festgelegten Zeile des jeweiligen Films bestimmt werden. Dieses Verfahren entspricht dem der Streakaufnahme. Des Weiteren soll überprüft werden, ob durch Kenntnis der Detonationsgeschwindigkeit ein einzelnes Bild des expandierenden Zylinders ausreichend ist, um die Bestimmung der radialen Expansion durchzuführen. Dies hätte den Vorteil, dass die zeitliche Auflösung der Aufnahme reduziert und dadurch bedingt die räumliche Auflösung erhöht werden könnte. So ließe sich der Messfehler der seitlichen Ausdehnung minimieren. Im besten Fall wäre eine exakt synchronisierbare Fotokamera ausreichend, um die Expansion zu dokumentieren.

Viele militärisch verwendete Sprengstoffe detonieren mit einer Geschwindigkeit von mehr als 6000 m/s. Im Gegensatz dazu sind die gebräuchlichen zivil genutzten Gesteinssprengstoffe mit einer Detonationsgeschwindigkeit von ca. 2000 m/s bis ca. 5500 m/s vergleichsweise langsam. Durch die Untersuchung verschiedener Sprengstofftypen soll gezeigt werden, dass das Zylindertestverfahren auch für die langsamer detonierenden, zivil genutzten Sprengstoffe Anwendung finden kann.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Detonation und Detonationstheorie

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Ergebnisse resultieren aus Detonationsprozessen. Deshalb sollen zunächst einige Grundlagen der Detonation und Detonationstheorie zum besseren Verständnis erläutert werden.

2.1.1. Detonation

Eine Detonation ist die chemische Umsetzung eines explosionsfähigen Stoffes. Die Reaktionsfront läuft dabei mit Überschallgeschwindigkeit durch den Explosivstoff. Die Reaktion ist mit einer Stoßwelle gekoppelt, in deren Wellenkopf hohe Temperatur- und Drucksprünge auftreten. Die Detonationswirkung beruht auf dem Freiwerden von großen Wärme- und Gasmengen. (KÖHLER und MEYER 1998)

Es gibt zwei Möglichkeiten wie eine Detonation entstehen kann. Eine schnelle Verbrennung oder Deflagration kann unter bestimmten äußeren Einflüssen - wie z. B. einem Einschluss - in eine Detonation übergehen. Dies wird als *Deflagration to Detonation Transition* (DDT) bezeichnet. Dabei nimmt die Geschwindigkeit der Reaktionsfront immer weiter zu, bis sie schließlich Überschallgeschwindigkeit erreicht und es zur Ausbildung einer Stoßwelle kommt.

Die zweite Möglichkeit eine Detonation auszulösen ist die Initiierung durch einen Schock. Dies wird beispielsweise bei Zündern (Detonatoren) ausgenutzt. Die Schockwelle eines primären Explosivstoffes führt zur Komprimierung des sekundären Explosivstoffes. Dadurch kommt es zu einem Temperatur- und Druckanstieg direkt hinter der Schockwellenfront, wodurch es zur Umsetzung des Explosivstoffes und zur weiteren Ausbreitung der Reaktionszone kommt. (KLAPÖTKE 2009, GREULICH 2004)

Zunächst wird die Schockwelle, die sich durch den Explosivstoff bewegt, beschleunigt, bis sie schließlich einen stationären Zustand erreicht hat. In diesem

stationären Zustand ist die freiwerdende Energie gleich der Summe der Energie, die als Wärme an die Umgebung abgegeben wird und der Energie, die zur Kompression des unreaktierten Explosivstoffes notwendig ist. Dadurch wird die Fortpflanzung der Stoßwelle zu einem selbsterhaltenden Prozess. (KLAPÖTKE 2009, HANDLEY 2011)

Es kann zwischen idealer und nicht-idealer Detonation unterschieden werden. Findet innerhalb der sehr schmalen Reaktionszone eine vollständige Umsetzung des Explosivstoffes statt, handelt es sich um eine ideale Detonation. Ist die Umsetzung innerhalb einer breiten Reaktionszone nicht vollständig, handelt es sich um eine nicht-ideale Detonation. Oftmals sind an die eigentliche detonative Umsetzung Verbrennungsreaktionen angeschlossen.

2.1.2. Hydrodynamische Detonationstheorie

Folgendes einfaches Modell eines Verdichtungsstoßes in einem Kolben mit Stößel kann die Entstehung einer ebenen Stoßwelle anschaulich erklären (Abbildung 2.1.1).

Wird ein Stößel in einem unzerstörbaren Kolben plötzlich beschleunigt und dann mit gleichbleibender Geschwindigkeit weiter bewegt, wird das Medium vor dem Stößel etwas komprimiert. Dabei steigt die Temperatur leicht an. Wird der Stößel nun weiter beschleunigt und mit der höheren, gleichbleibenden Geschwindigkeit weiter bewegt, wird das bereits komprimierte und erwärmte Medium weiter komprimiert und dadurch weiter erwärmt. Die neue Kompression läuft durch das schon in Bewegung befindliche Medium schneller voran, da sich die Materiebewegung überlagert und zudem auch die Schallgeschwindigkeit im erwärmten Medium höher ist. Wird dieser Vorgang mehrmals wiederholt, kommt es zur Ausbildung einer steilen Druckfront. (KÖHLER und MEYER 1998, LEE 1998, u. a.)

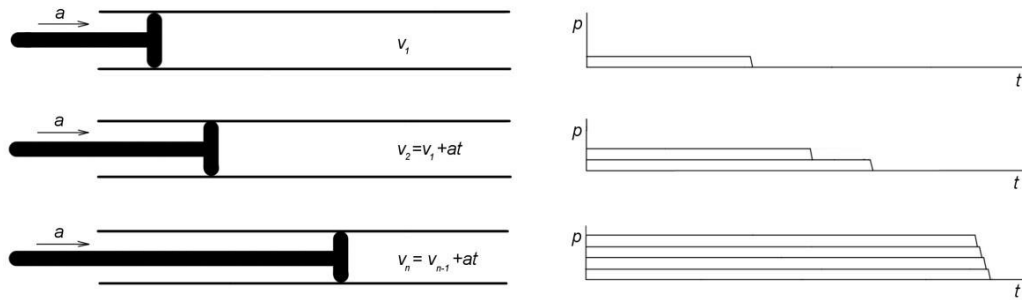


Abbildung 2.1.1: Schematische Darstellung der Entstehung einer ebenen Stoßwelle. (nach KÖHLER und MEYER 1998, LEE 1998, u. a.)

Im Wellenkopf der Stoßwelle kommt es aufgrund der drastischen Druck- und Temperaturerhöhungen zur chemischen Reaktion des Explosivstoffes. Durch die Energie der Reaktion kann der Vorgang der Stoßwellenbildung aufrechterhalten werden. Die Stoßwelle bewegt sich mit gleicher Geschwindigkeit wie die reaktive Umsetzung vorwärts. Stoßwellengeschwindigkeit und Detonationsgeschwindigkeit sind also gleich.

Unter Berücksichtigung der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung, wurden durch Vergleichsbetrachtungen zwischen unreaktierten Explosivstoff (Index 0) und den unverdünnten Detonationsprodukten im ebenen Verdichtungsstoß am Ende der Reaktionszone (Index 1) die nachfolgenden Zusammenhänge ermittelt. (KÖHLER und MEYER 1998, HORNBERG 1986 u.a.)

Aus dem Massevergleich ergibt sich

$$\rho_0 \cdot v_D = \rho_1 \cdot (v_D - v_w) \quad (2.1.1)$$

bzw.

$$v_1 \cdot v_D = v_0 \cdot (v_D - v_w). \quad (2.1.2)$$

$$\text{mit } v_i = \frac{1}{\rho_i}$$

Aus dem Impulssatz ergibt sich

$$p_1 - p_0 = \rho_0 \cdot v_D \cdot v_W \quad (2.1.3)$$

bzw.

$$(p_1 - p_0) \cdot v_0 = v_D \cdot v_W \cdot \quad (2.1.4)$$

Und aus dem Energievergleich ergibt sich

$$p_1 \cdot v_W = \rho_0 \cdot v_D \cdot \left(e_1 - e_0 + \frac{v_W^2}{2} \right). \quad (2.1.5)$$

Hierbei bedeuten ρ_0 die Dichte des Explosivstoffes, ρ_1 die Dichte der Schwaden, v das spezifische Volumen, p ist der Druck, v_D ist die Detonationsgeschwindigkeit, v_W die Schwadengeschwindigkeit und e die spezifische innere Energie. Die Indizes 0 stehen für den unreaktierten Explosivstoff, die Indizes 1 für die Detonationsprodukte. (KÖHLER und MEYER 1998, HORNBERG 1986 u.a.)

Durch Umstellung der Gleichungen 2.1.2 und 2.1.4 wird für die Detonationsgeschwindigkeit v_D die Beziehung

$$v_D = v_0 \cdot \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}} \quad (2.1.6)$$

erhalten. Für die Schwadengeschwindigkeit v_W ergibt sich

$$v_W = \sqrt{(p_1 - p_0) \cdot (v_0 - v_1)}. \quad (2.1.7)$$

Aus den oben genannten Gleichungen 2.1.1 bis 2.1.5 wird durch Umrechnung die HUGONIOT-Gleichung erhalten:

$$e_1 - e_0 = \frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_0) \cdot (v_0 - v_1) \quad . \quad (2.1.8)$$

Unter Einbeziehung der exothermen chemischen Umsetzungsenergie q (sogenannte Detonationswärme) ergibt sich folgende HUGONIOT-Gleichung für einen Detonationsvorgang:

$$e_1 - e_0 - q = \frac{1}{2} \cdot (p_1 + p_0) \cdot (v_0 - v_1). \quad (2.1.9)$$

Im Zustandsdiagramm (Druck-Volumen-Diagramm, Abbildung 2.1.2) wird die adiabatische Funktion der Detonationsprodukte von der sogenannten RAYLEIGH-Geraden tangiert. Die RAYLEIGH-Gerade ergibt sich aus dem Impulssatz (Gleichung 2.1.3) und hat die Steigung $-\rho_0^2 \cdot v_D$

$$p_1 - p_0 = (v_0 - v_1) \cdot \rho_0^2 \cdot v_D^2. \quad (2.1.10)$$

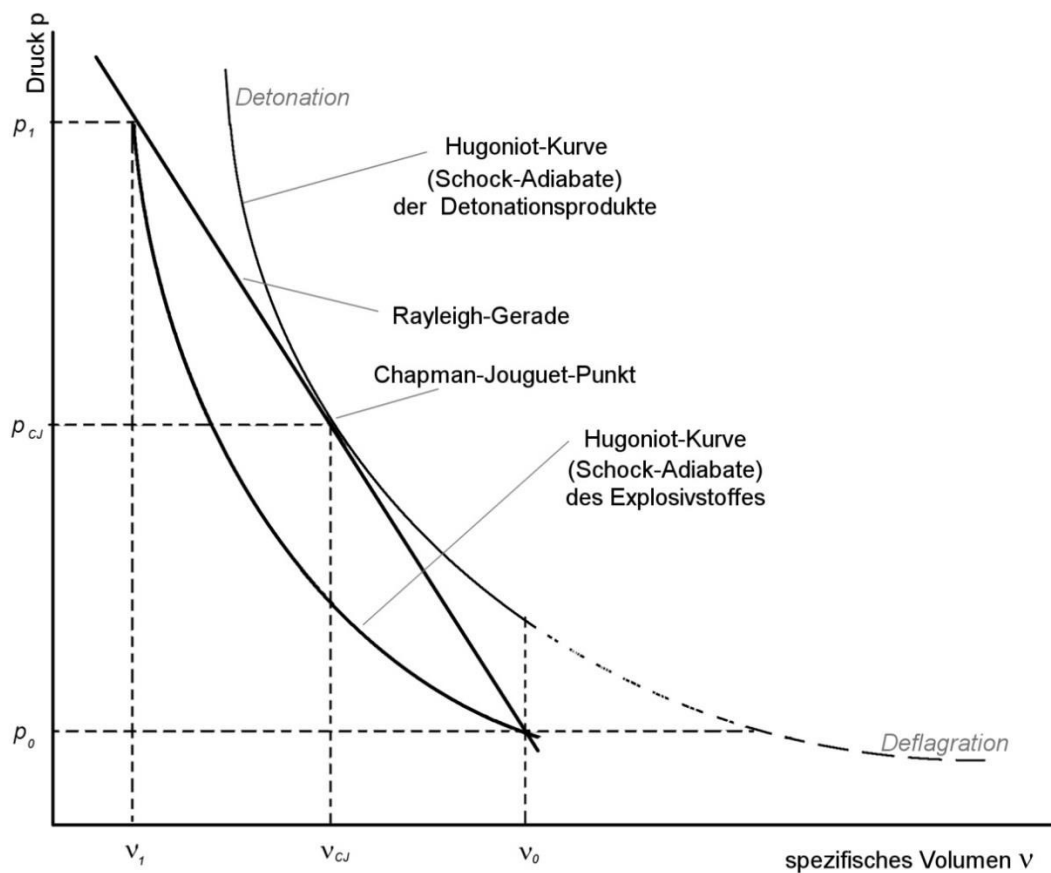


Abbildung 2.1.2: Zustandsdiagramm mit HUGONIOT-Kurve und RAYLEIGH-Gerade. (nach KÖHLER und MEYER 1998, KLAPÖTKE 2009, LEE 1998)

Der Punkt, an dem die RAYLEIGH-Gerade die HUGONIOT-Kurve tangiert, wird als CHAPMAN-JOUGUET-Punkt (kurz CJ-Punkt) bezeichnet. Die entsprechende CJ-Ebene markiert das Ende der chemischen Reaktion, d. h. ab diesem Punkt können die Explosionsgase expandieren. Dies wird als Verdünnungs- oder TAYLER-Kurve bezeichnet (Abbildung 2.1.3). (KÖHLER und MEYER 1998, KLAPÖTKE 2009, LEE 1998 u. a.)

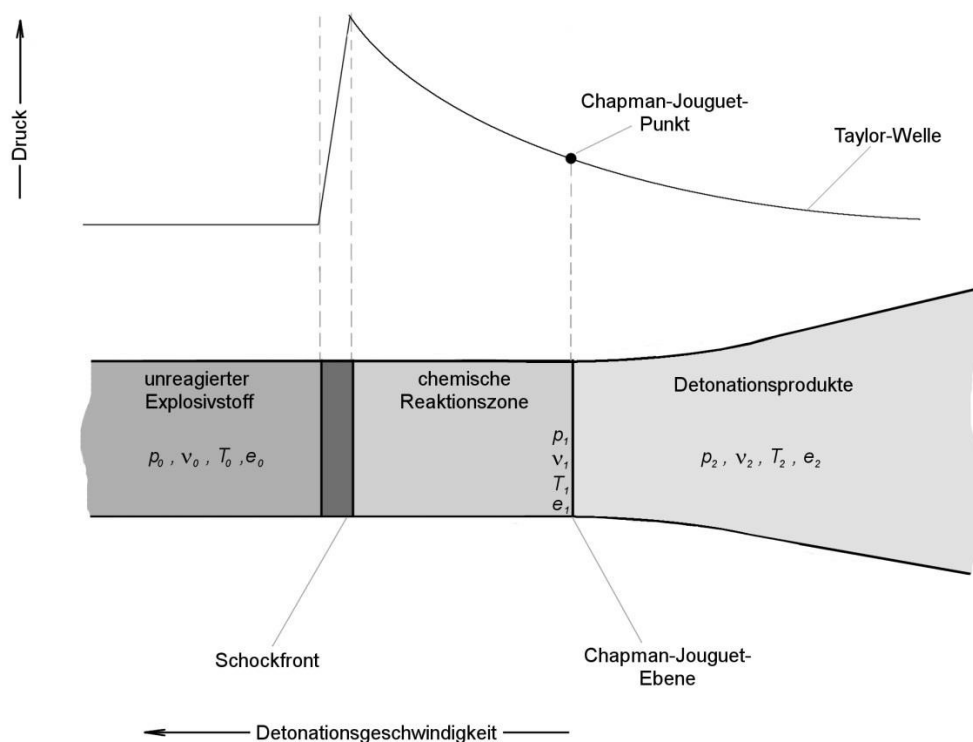


Abbildung 2.1.3: Schematische Darstellung der Detonationswelle. (nach KÖHLER und MEYER 1998, KLAPÖTKE 2009, LEE 1998)

Die Detonation hat am CJ-Punkt einen stabilen Zustand erreicht und läuft mit konstanter Intensität und konstanter Geschwindigkeit durch das Medium. Die Detonationsgeschwindigkeit $v_{D,CJ}$ setzt sich dort aus der Summe der Schwadengeschwindigkeit $v_{W,CJ}$ und der Schallgeschwindigkeit $v_{C,CJ}$ zusammen: (LEE 1998, KÖHLER und MEYER 1998)

$$v_{D,CJ} = v_{W,CJ} + v_{C,CJ} \quad (2.1.11)$$

2.2. GURNEY-Energie und Gurney-Modell

Verschiedene physikalische Eigenschaften eines Sprengstoffes tragen zu seiner Leistungsfähigkeit bei. Je nach Anwendungsgebiet stehen unterschiedliche Aspekte im Vordergrund. Bei Gewinnungssprengungen im Berg- und Tagebau sind bsp. eine hohe Gasausbeute und eine hohe Explosionswärme maßgeblicher für das Arbeitsvermögen als bei Anwendungsbereichen, in denen eine hohe Zertrümmerung erzielt werden soll. Dort sind hohe Detonationsgeschwindigkeiten und große Dichten maßgeblicher. (KÖHLER und MEYER 1998, GROSSE AUSTING 2008)

Eine Möglichkeit, das Arbeitsvermögen eines Sprengstoffes abzuschätzen, ist seine spezifische Energie. Sie gibt die theoretisch errechenbare Arbeitsleistung pro Kilogramm wieder. Unter der Annahme, dass die Detonation in einem unzerstörbaren, wärmeundurchlässigen Einschluss erfolgt, kann die spezifische Energie E mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung berechnet werden.

$$E = p \cdot V_{\text{Gas}} = n \cdot R \cdot T_{\text{Ex}} \quad (2.2.1)$$

Hierbei ist p der Druck, V_{Gas} das Volumen der Explosionsgase, n die Stoffmenge der gasförmigen Explosionsprodukte, R die allgemeine Gaskonstante und T_{Ex} die theoretische Explosionstemperatur.

Daneben existiert eine Reihe von Tests, die eine vergleichende Ermittlung des Arbeitsvermögens eines Sprengstoffes zulassen. Weit verbreitet sind dabei die Bleiblockausbauchung nach TRAUZL und der ballistische Mörser. Im ersten Fall wird die Ausbauchung einer im Bleiblock befindlichen Bohrung als Folge der Detonationswirkung des zu untersuchenden Sprengstoffes bestimmt. Im Falle des ballistischen Mörsers wird die Rückstoßkraft eines als Pendel aufgehängenen Stahlgewichtes durch Messung des Ausschlagwinkels ermittelt. Beide Verfahren haben den Nachteil, dass die untersuchte Explosivstoffmenge mit ca. 10 g recht gering ist und gerade Gesteinssprengstoffe in so kleiner Menge nicht vollständig umgesetzt werden. (KÖHLER und MEYER 1998, GROSSE AUSTING 2008)

Im militärischen Bereich hat sich seit einigen Jahrzehnten die GURNEY-Energie zur vergleichenden Darstellung des Leistungsvermögens eines Sprengstoffes etabliert. (HORNBERG 1986, KESHAVERZ 2008 u.a.) Ein wichtiges Verfahren zur Bestimmung der Gurney-Energie sind sogenannte Zylindertests (siehe hierzu Kapitel 2.4), die es erlauben größere Explosivstoffmengen zu untersuchen. Auch im zivilen Bereich gibt es erste Ansätze die GURNEY-Energie zur Charakterisierung von Sprengstoffen zu bestimmen. (OUCHTERLONY 2003, 2005)

In den frühen 1940er Jahren - während des Zweiten Weltkrieges - beschäftigte sich RONALD W. GURNEY (1943) mit der Fragmentierung von Bomben und Granaten. Das Ziel militärischer Forschungsarbeiten in dieser Zeit war die Verbesserung und Optimierung der Kriegswaffen. Überreste und Blindgänger alliierter Bomben lassen sich noch heute in vielen Teilen der Bundesrepublik und Europas finden. (SPYRA *et al.* 1991) Im Vordergrund von GURNEYS Untersuchungen stand die Geschwindigkeit der Metallummantelung zum Zeitpunkt der Fragmentierung von zylinder- und kugelförmigen Ladungen. Aus diesen beiden Geometrieformen lassen sich Rückschlüsse auf die Fragmentierung von Bomben und Granaten und somit auf deren Effizienz ziehen.

Die durch die Explosion entstandenen Explosionsgase (Schwaden) führen zunächst zu einer gleichmäßigen Aufweitung der Metallhülle, bis diese schließlich zerreißt. Die Geschwindigkeit der Fragmente zum Zeitpunkt des Auseinanderreißens entspricht der Geschwindigkeit der Schwaden die in unmittelbarem Kontakt zur Metallhülle stehen. Die totale kinetische Energie pro Masseneinheit des Sprengstoffes e_{tot} ist unabhängig von der Art des Projektils, der Bombe oder der Granate, nicht aber von dessen Geometrie. Unter der Annahme, dass die radiale Ausbreitung der Sprengstoffschwaden gleichmäßig erfolgt, es also keinen Dichte- oder Geschwindigkeitsgradienten entlang der radialen Ausbreitungsebene gibt, lässt sich für einen Zylinder die totale kinetische Energie der metallummantelten Sprengladung pro Längeneinheit mit

$$e_{tot,Zylinder} = e_M + e_F = \frac{1}{2} \cdot m_M \cdot v_0^2 + \frac{1}{2} \cdot v_0^2 \cdot \int_0^{r_{max}} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot \frac{r^2}{r_{max}^2} \cdot dr \quad (2.2.2)$$

darstellen. Die totale kinetische Energie setzt sich aus den kinetischen Energien der Metallhülle e_M und die der Explosionsprodukte e_F zusammen. Hierbei ist r der Radius der Metallhülle, die bei r_{max} fragmentiert wird. v_0 ist die Anfangsgeschwindigkeit der Fragmente, m_M die Masse der Metallhülle pro Längeneinheit und ρ die Dichte.

Die totale kinetische Energie einer sphärischen Ladung lässt sich bei analogen Voraussetzungen mit

$$e_{tot,Kugel} = \frac{1}{2} \cdot m_M \cdot v_0^2 + \frac{1}{2} \cdot v_0^2 \cdot \int_0^{r_{max}} 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho_0 \cdot \frac{r^2}{r_{max}^2} \cdot dr \quad (2.2.3)$$

darstellen.

Aus Gleichung 2.2.2 ergibt sich für eine zylindrische Ladung die Anfangsgeschwindigkeit v_0 der Fragmente und somit die Endgeschwindigkeit der intakten, aber gedehnten Metallhülle mit

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot e \cdot \frac{m_C}{m_M + \frac{m_C}{2}}} \quad (2.2.4)$$

wobei m_C ist die Masse des Explosivstoffes pro Längeneinheit ist.

Im Fall der kugelförmigen Ladung ist die Geschwindigkeit

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot e \cdot \frac{m_C}{m_M + \frac{3 \cdot m_C}{5}}} \quad (2.2.5)$$

(GURNEY 1943)

Die darin enthaltene spezifische kinetische Energie e ist eine sprengstoffspezifische Konstante. Demzufolge ist die Anfangsgeschwindigkeit der Fragmente nur von der Geometrie der Sprengladung und dem Verhältnis der Metall- und Explosivstoffmasse abhängig. Die Energie e wird in der Literatur als

GURNEY-Energie bezeichnet (z. B. JACOBS 1980, HORNBERG 1986). Die GURNEY-Energie e_G gilt als Maß für das Arbeitsvermögen eines Sprengstoffes und lässt vergleichende Aussagen über die Leistungsfähigkeit eines Sprengstoffes zu. Die GURNEY-Energie setzt sich aus der kinetischen Energie des aufgeweiteten Metalls und der entstandenen Detonationsprodukte zusammen (vergleiche Gleichung 2.2.2 und Gleichung 2.2.3). Üblicherweise wird sie in der Form

$$e_G = \frac{v_L^2}{2} \cdot \left(\frac{m_M}{m_C} + \frac{n}{n+2} \right) \quad (2.2.6)$$

dargestellt.

Die Endgeschwindigkeit v_L der Metallwand ist gleich der von GURNEY beschriebenen Anfangsgeschwindigkeit v_0 der Fragmente. Die Geometrie der Ladung wird durch den Geometriefaktor n berücksichtigt.

Das GURNEY-Modell wird für unterschiedliche symmetrische Geometrieformen unterschieden: Sandwich, Zylinder, Kugel. Für kugelförmige Ladungen ist $n = 3$, für zylindrische Ladungen ist $n = 2$ und für Sandwich-Ladungen ist $n = 1$ (Abbildung 2.2.1).

Des Weiteren gibt es noch Beschreibungen für asymmetrische *Sandwich*- und *Open-face-Sandwich*- Ladungen (Abbildung 2.2.1). (KENNEDY 1998) Für diese asymmetrischen Geometrieformen ist kein einfacher Symmetriefaktor für die GURNEY-Gleichung vorhanden. Die GURNEY-Gleichung für das asymmetrische Sandwich folgendermaßen lässt sich mit

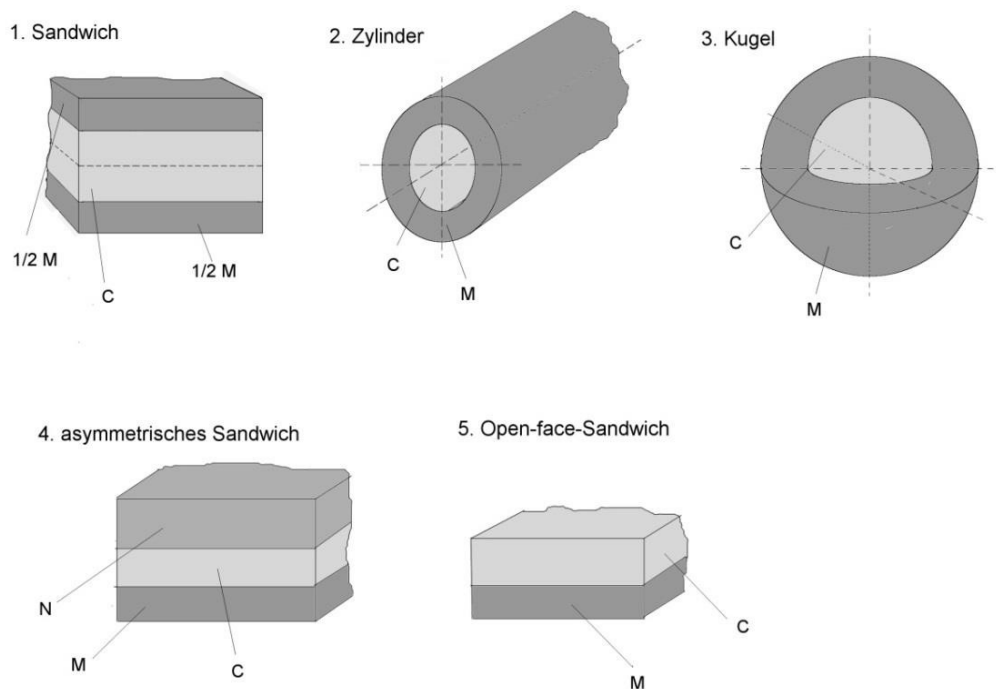
$$e_G = \frac{v_M^2}{2} \cdot \left(\frac{1 + A^3}{3 \cdot (1 + A)} + \frac{m_N}{m_C} \cdot A^2 + \frac{m_M}{m_C} \right) \quad (2.2.7)$$

$$\text{mit } A = \frac{1 + 2 \cdot \frac{m_M}{m_C}}{1 + 2 \cdot \frac{m_N}{m_C}}$$

darstellen. Für die Geometrie des *Open-face-Sandwiches* wurde folgende GURNEY-Gleichung ermittelt

$$e_G = \frac{v_M^2}{2} \cdot \left(\frac{\left(1 + 2 \cdot \frac{m_M}{m_C} \right)^3 + 1}{6 \cdot \left(1 + \frac{m_M}{m_C} \right)} + \frac{m_M}{m_C} \right) \quad (2.2.8)$$

m_M und m_N sind hierbei die Massen der Metallplatten, m_C die Masse des Explosivstoffes pro Längeneinheit und v_M die Geschwindigkeit der Metallplatte.



**Abbildung 2.2.1: Geometrieformen des GURNEY-Modells.
(nach KENNEDY 1998)**

In der Literatur findet sich häufig neben oder statt der GURNEY-Energie die Angabe der sogenannten GURNEY-Geschwindigkeit. (z.B. HORNBERG und VOLK 1989, KOCH *et al.* 2002 u.a.) Die GURNEY-Geschwindigkeit v_G ist ebenso eine sprengstoffspezifische Größe wie die GURNEY-Energie e_G . Beide Größen stehen in dem einfachen Zusammenhang

$$v_G = \sqrt{2 \cdot e_G} \quad (2.2.9)$$

zueinander. Die GURNEY-Geschwindigkeit wird häufig auch als GURNEY-Konstante bezeichnet.

Durch Kenntnis der GURNEY-Konstanten lassen sich die gerade in Steinbrüchen interessierende maximale Schleuderweite a_S und die Anfangsgeschwindigkeit v_0 von gesprengten Gesteinsbrocken unter idealisierten Bedingungen (d.h. bei einem Austrittswinkel von 45° von der Stirnseite des Gesteins) wie folgt ermitteln:

$$\text{Schleuderweite} \quad a_S = \frac{v_0^2}{g}, \quad (2.2.10)$$

$$\text{Anfangsgeschwindigkeit} \quad v_0 = v_G \cdot \sqrt{\frac{q_{Ex}}{\rho_s}}. \quad (2.2.11)$$

Dabei ist q_{Ex} der spezifische Sprengstoffbedarf, ρ_s die Dichte des Gesteins und g die Erdbeschleunigung. (ROTH 1983)

Die Flugplattengeschwindigkeit v_M bei sogenannten Schockwellensynthesen, bei denen chemische Verbindungen aufgrund der hohen Energieübertragung einer gerichteten Detonation entstehen, lässt sich mit Kenntnis der GURNEY-Energie bzw. GURNEY-Konstanten durch

$$v_M = \sqrt{2 \cdot e_G} \cdot \sqrt{\frac{3}{1 + \frac{5 \cdot m_M}{m_C} + 4 \cdot \frac{m_M^2}{m_C^2}}} \quad (2.2.12)$$

ermitteln. (SCHLOTAUER 2012)

Für viele untersuchte Sprengstoffe findet sich in der Literatur folgender empirischer Zusammenhang zwischen der GURNEY-Geschwindigkeit und der Detonationsgeschwindigkeit v_D des Sprengstoffes:

$$v_G \approx \frac{v_D}{3}. \quad (2.2.13)$$

(KOCH *et al.* 2002)

Tabelle 2.1 zeigt einige Beispiele der Detonationsgeschwindigkeit und der GURNEY-Geschwindigkeiten einiger Vertreter hauptsächlich militärisch genutzter Sprengstoffe. (nach KOCH *et al.* 2002)

Tabelle 2.1: Beispiele für Detonationsgeschwindigkeit, GURNEY-Geschwindigkeit und deren Verhältnis.

Explosivstoff	Detonations- geschwindigkeit v_D [km / s]	GURNEY- Geschwindigkeit v_G [km / s]	Verhältnis von v_D / v_G
Comp. B	7,92	2,68	2,96
HMX	9,11	2,97	3,07
Octol 75/25	8,48	2,80	3,03
PETN	8,26	2,93	2,82
RDX	8,70	2,83	3,07
Tetryl	7,57	2,50	3,03
TNT	6,86	2,37	2,89

Das Verhältnis von Detonationsgeschwindigkeit und GURNEY-Geschwindigkeit bei den oben aufgeführten Beispielen ist ungefähr 3. Auch bei vielen anderen

Sprengstoffen, die ein annähernd ideales Detonationsverhalten aufweisen, ist dieser empirische Zusammenhang nachgewiesen worden. (KOCH *et al.* 2002)

2.3. Zustandsgleichungen

Neben den experimentellen Arbeiten gewinnen Simulationen immer mehr an Bedeutung. Computer-Codes zur numerischen Simulation verwenden zur Darstellung dynamischer Prozesse, wie z. B. dem Druckverlauf während einer Detonation, Zustandsgleichungen. Zustandsgleichungen beschreiben den funktionalen Zusammenhang zwischen den einzelnen Zustandsgrößen eines thermodynamischen Prozesses. Zustandsgrößen sind physikalische Parameter, die den momentanen Zustand des Systems beschreiben.

Eine häufig angewandte Zustandsgleichung ist die ideale Gasgleichung

$$p = \frac{R \cdot T}{v_m} . \quad (2.33.1)$$

$$\text{mit } v_m = \frac{V_{\text{Gas}}}{n}$$

Der Druck p , das molare Volumen v_m und die Temperatur T sind dabei die variablen Zustandsgrößen, die den momentanen Zustand des thermodynamischen Systems beschreiben. R ist die allgemeine Gaskonstante, V_{Gas} das Volumen des Gases und n die Stoffmenge.

Die Zustandsgleichung für ideale Gase ist jedoch kein geeignetes Mittel um den thermodynamischen Prozess während einer Detonation zu beschreiben, da sich die Detonationsprodukte nicht wie ein ideales Gas verhalten.

Die VAN-DER-WAALS-Gleichung stellt eine angenäherte Zustandsgleichung für reale Gase dar.

$$p = \frac{R \cdot T}{v_m - b} - \frac{a}{v_m^2} . \quad (2.3.2)$$

Der Kohäsionsdruck a und das Co-Volumen b berücksichtigen das Eigenvolumen der Gasmoleküle und die Wechselwirkungen zwischen den Molekülen.

Aber auch diese Gleichung ist für Detonationen keine geeignete Zustandsgleichung, da die VAN-DER-WAALS-Gleichung bei sehr hohen Drücken, wie sie bei einer Detonation auftreten, versagt.

Unter der Annahme, dass die Energie der intermolekularen Wechselwirkung der Gasteilchen im Vergleich zu ihrer kinetischen Energie während eines Detonationsvorganges sehr klein ist, kann der Term a/v_m^2 vernachlässigt werden. Die so erhaltene Gleichung wird ABEL-Zustandsgleichung (oder auch NOBEL-ABEL-Zustandsgleichung) genannt.

$$p \cdot (v_m - b) = R \cdot T \quad (2.3.3)$$

(DAVIS 1998, JOHNSTEN 2005)

In der Literatur (z.B. DAVIS 1998) finden sich zahlreiche weitere Zustandsgleichungen zur Beschreibung von Detonationsprozessen. Eine der weitverbreitetsten Zustandsgleichung ist die JONES-WILKENS-LEE-Zustandsgleichung - kurz JWL-Zustandsgleichung. (DAVIS 1998, SOURS *et al.* 1995)

2.3.1. JWL-Zustandsgleichung

Die JONES-WILKINS-LEE-Zustandsgleichung beschreibt den Druckverlauf der Explosionsprodukte (Schwaden) während der Detonation, also während der Ausbreitung der Schwaden. Sie wird für zahlreiche technische Berechnungen und Computercodes zur Simulation von Detonationsprozessen verwendet. (DAVIS 1998, SOURS *et al.* 1995)

Wie KÜHL (2010) anschaulich zusammengefasst hat, wurde diese Zustandsgleichung 1968 von LEE aus den beiden Zustandsgleichungen von

JONES und MILLER aus dem Jahr 1948 (Gleichung 2.3.4) und WILKINS aus dem Jahr 1964 (Gleichung 2.3.5) entwickelt.

$$p = A \cdot e^{-R \cdot V} - B + C \cdot T \quad (2.3.4)$$

$$p = \frac{\alpha}{V^Q} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R \cdot V}\right) \cdot e^{-R \cdot V} + \frac{\omega \cdot e}{V} \quad (2.3.5)$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{a \cdot (Q - 1)}{(Q - 1 - \omega)}.$$

In der Literatur sind zwei äquivalente Formen der allgemeinen JWL-Zustandsgleichung zu finden:

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega \cdot \eta}{R_1}\right) \cdot e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega \cdot \eta}{R_2}\right) \cdot e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \cdot \rho \cdot e \quad (2.3.6)$$

bzw.

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot e_V}{V}. \quad (2.3.7)$$

Hierbei ist p der Druck; A , B , R_1 , R_2 und ω sind empirisch zu ermittelnde Konstanten, ρ die Dichte, η beschreibt das Verhältnis zwischen Dichte und Referenzdichte ρ_0 , e ist die spezifische innere Energie, e_V die spezifische, dichtebezogene innere Energie und V ist das Volumenverhältnis zwischen dem Expansionsvolumen v_i und dem Ausgangsvolumen v_0 .

Bei Betrachtung des Drucks bei konstanter Entropie p_S , wird folgende isentrope Form der JWL-Zustandsgleichung erhalten:

$$p_S = A \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{V^{\omega+1}}. \quad (2.3.8)$$

Der Index S kennzeichnet den Druck bei konstanter Entropie S . Die Konstante C ist ein weiterer JWL-Parameter und gibt gleichzeitig die Auswahl einer bestimmten Isentrope an. (DAVIS 1998, MILLER und ALEXANDER 1989)

Durch Integration der thermodynamischen Gleichung

$$\left(\frac{\partial e}{\partial v}\right)_S = -p \text{ bzw. } \left(\frac{\partial e_V}{\partial V}\right)_S = -p \quad (2.3.9)$$

$$\text{mit } e_V = \rho_0 \cdot e$$

kann die volumenspezifische Energie der Isentrope e_S erhalten werden:

$$e_S(v) = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 \cdot v} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot v} + \frac{C}{\omega \cdot V^\omega} \quad (2.3.10)$$

(DAVIS 1998)

Der Druck p lässt sich auch mit Hilfe einer TAYLOR-Ausdehnung unter Einbeziehung des sogenannten GRÜNEISEN-Parameters Γ ausdrücken:

$$p = p_S(v) + \frac{\Gamma}{V} \cdot [e - e_S(v) \cdot v] + \dots \quad (2.3.11)$$

Dabei liegen die Werte von $p_S(v)$ und $e_S(v)$ auf der Isentropen. Der GRÜNEISEN-Parameter bleibt konstant und ist durch folgende thermodynamischen Zusammenhänge definiert:

$$\left(\frac{\partial e_V}{\partial p}\right)_v = \frac{v}{\Gamma} \text{ bzw. } \left(\frac{\partial e}{\partial p}\right)_v = \frac{V}{\Gamma} \quad (2.3.12)$$

und

$$\left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln V}\right)_S = -\Gamma. \quad (2.3.13)$$

T ist dabei die Gastemperatur. (DAVIS 1998, HORNBERG 1986)

Der GRÜNEISEN-Parameter Γ entspricht dem JWL-Parameter ω . (DAVIS 1998)
 Ausgehend von den Gleichungen 2.3.12 und 2.3.13 ergibt sich durch Integration die MIE-GRÜNEISEN-Zustandsgleichung

$$p = p_s(v) + \frac{\omega}{V} \cdot [e_v - e_s(v)]. \quad (2.3.14)$$

(HORNBERG 1986, NAGAYAMA und KUBOTA 2003)

Unter Verwendung der Gleichung 2.3.8 wird für die spezifische Energie $e_s(v)$ entlang der Isentropen wieder der Zusammenhang

$$e_s(v) = -\int p_s \cdot dV = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 \cdot V} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{\omega \cdot V^\omega} \quad (2.3.15)$$

erhalten. (HORNBERG 1986)

Untersuchungen des Verhaltens der Detonationsprodukte in Zylindertests mit zweidimensionalen hydrodynamischen Berechnungen zeigte, dass die Ausdehnung der Detonationsprodukte entlang der CHAPMAN-JOUGUET-Isentropen erfolgt. (MILLER und ALEXANDER 1989) Somit lässt sich die isentrope JWL-Gleichung wie folgt darstellen:

$$p_{CJ} = A \cdot e^{-R_1 \cdot V_{CJ}} + B \cdot e^{-R_2 \cdot V_{CJ}} + \frac{C}{V_{CJ}^{\omega+1}} \quad (2.3.16)$$

(HORNBERG 1986)

Da p_0 sehr viel kleiner als p_{CJ} ist, ergibt sich durch Kombination der Gleichungen 2.3.15 mit der HUGONIOT -Gleichung nach Gleichung 2.1.9:

$$e_{v,0} + \frac{1}{2} \cdot p_{CJ} \cdot (1 - V_{CJ}) = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 \cdot V_{CJ}} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot V_{CJ}} + \frac{C}{\omega \cdot V_{CJ}^\omega} \quad (2.3.17)$$

(HORNBERG 1986)

Die verschiedenen Terme der JWL-Gleichung beschreiben die unterschiedlichen Phasen des Druckverlaufes. Die Terme mit exponentiellen Anteil stehen dabei für hohe Drücke bei kleinem Volumen (so genannte *high pressure*-Terme). Der rechte Term der Gleichung steht für den Bereich mit geringerem Druck bei

großem Volumen (so genannter *low pressure*-Term), also für den Zeitpunkt der fortgeschrittenen Expansion. Üblicherweise unterscheiden sich die JWL-Parameter R_1 und R_2 deutlich voneinander, da sie unterschiedliche Bereiche der Expansion beschreiben. (DAVIS 1998)

Die sechs JWL-Parameter A , B , C , R_1 , R_2 und ω lassen sich aus den Daten von Zylinderexpansionstests durch Annäherungen der ermittelten Energie-Volumen-Kurve der Schwadenexpansion ermitteln. (Vergleiche hierzu Kapitel 2.4.3)

2.4. Zylindertests

Ausgehend von den Untersuchungen von R.W. GURNEY (1943) wurde zur Charakterisierung von zunächst militärisch genutzten Sprengstoffen unter anderem der sogenannte Zylindertest oder Zylinderexpansionstest in den 1960er Jahren in den USA entwickelt. Neben der Bestimmung der GURNEY-Energie und GURNEY-Geschwindigkeit erlauben die Zylindertestdaten auch die Ermittlung der JWL-Parameter. (KURY *et al.* 1968, HORNBERG und VOLK 1989, HILL und CATANACH 1998 u. a.)

Bei einem Zylindertest wird ein Metallzylinder homogen mit dem zu untersuchenden Sprengstoff gefüllt. Dieser wird an der Oberseite initiiert und die radiale (seitliche) Ausdehnung der Metallwand infolge der Entwicklung der Explosionsgase in Abhängigkeit der Zeit aufgezeichnet. Abbildung 2.4.1 zeigt schematisch die Rohraufweitung während eines Zylindertests. Die Detonation läuft von oben nach unten, wobei die Metallwand zunächst trichterförmig ausgedehnt wird bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Fragmentierung einsetzt.

Es wird standardmäßig niedrig-legiertes, sauerstofffreies Kupfer als Zylindermaterial verwendet. Kupfer hat eine höhere Duktilität als z. B. Stahl. Dies bedeutet, dass die Dehnung durch die entstehenden Explosionsgase bis zum Zeitpunkt der Fragmentierung bei Kupfer größer ist als bei Stahl.

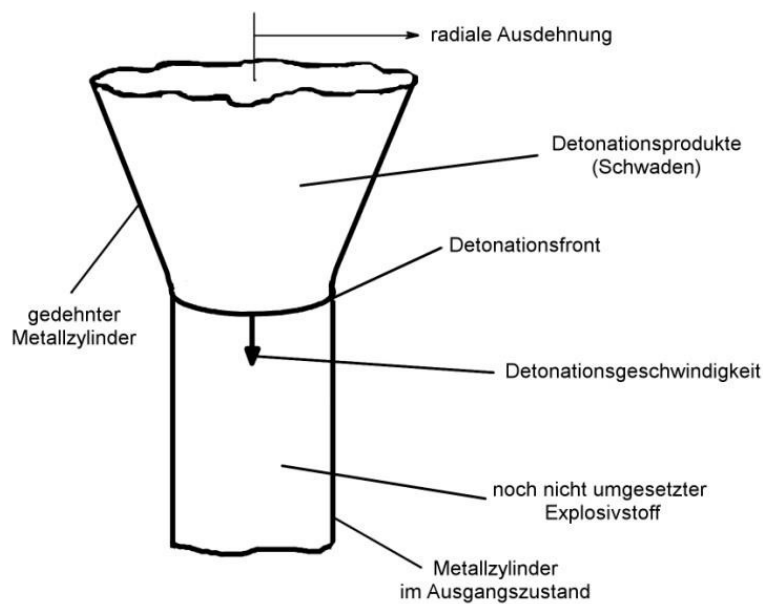


Abbildung 2.4.1: Schematische Darstellung der Rohraufweitung während eines Zylindertests.

Der militärische Standard-Zylindertest wird in Kupferrohren mit einem Durchmesser von 1" (= 2,54 cm) und einer Länge von ca. 25 cm durchgeführt. Diese Maße sind für zivil genutzte Sprengstoffe ungeeignet. Der kritische Durchmesser der meisten zivilen Sprengstoffe liegt höher. Das heißt, dass es zu einem „Abreißen“ der Detonation kommen kann, wenn der kritische Durchmesser des Sprengstoffes unterschritten wird. Um eine durchgehende Detonation zu gewährleisten, wurden aus diesem Grund in der vorliegenden Arbeit Kupferrohre mit einem inneren Durchmesser von 40 mm verwendet. Somit ist der kritische Durchmesser der hier verwendeten zivil genutzten Sprengstoffe überschritten. Die Länge der Kupferrohre wurde mit 500 mm so gewählt, dass den Sprengstoffen eine gewisse Anlaufstrecke zur Verfügung steht. So konnte der Sprengstoff seine stationäre Detonationsgeschwindigkeit erreichen, bevor die Aufnahme der radialen Ausdehnung gestartet wurde. Auch so genannte Übersteuerungseffekte, die durch die höhere Detonationsgeschwindigkeit des zur Initiierung verwendeten Boosters (Verstärkerladung) entstehen können, wurden so während der Aufzeichnung der Rohraufweitung vermieden.

2.4.1. Aufnahmetechniken

Üblicherweise wird zur Visualisierung der Aufweitung der Kupferrohrwand bei Zylindertests eine Streakaufnahme aufgezeichnet. Dies bedeutet, dass ein schmaler Streifen des sich aufweitenden Zylinders, z. B. mit einer Drehspiegelkamera, aufgenommen wird. Dabei wird ein Film (bzw. Sensor in der Digitaltechnik) mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit durch einen schmalen Schlitz (ca. 0,05 mm) belichtet. Da die Geschwindigkeit, mit der der Film bzw. der Sensor belichtet wird, bekannt ist, erhält man einen zeitlichen Verlauf der Expansion des Zylinders. (CATANACH *et al.* 1999, HILL und CATANACH 1998 u.a.)

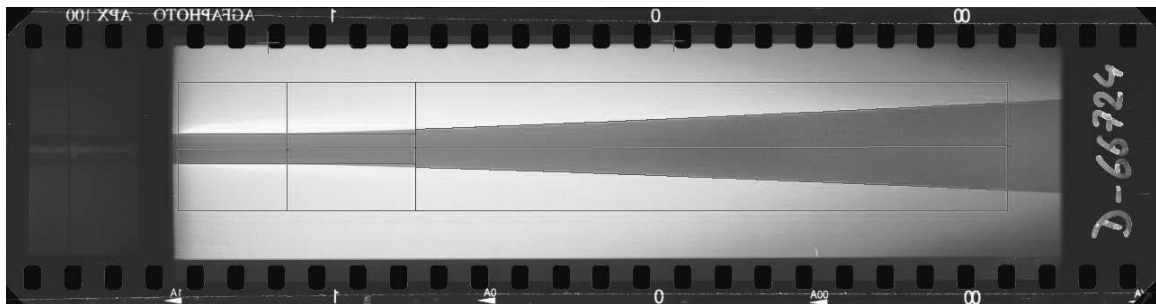


Abbildung 2.4.2: Streakaufnahme mit einer Drehspiegelkamera eines militärischen Sprengstoffes, MBDA-TDW. (ARNOLD 2011)

Abbildung 2.4.2 zeigt eine Streakaufnahme eines militärischen Sprengstoffes bei der Firma MBDA-TDW GESELLSCHAFT FÜR VERTEIDIGUNGSTECHNISCHE WIRKSYSTEME MBH. In der Abbildung ist die Aufweitung der Kupferrohrwand von links nach rechts bei fortschreitender Zeit deutlich zu erkennen. Dieser Radius-Zeit-Verlauf stellt die Geschwindigkeit der sich ausdehnenden Kupferrohrwand in einer vorher festgelegten Höhe des Zylinders dar.

Eine andere Methode zur Detektierung der Expansion der Metallhülle ist das Anbringen von Metallpins (Messfühler) in einem vorher genau definierten Abstand zum Kupferzylinder (Abbildung 2.4.3). (OUCHTERLONY *et al.* 2003, 2005)

Diese auf gleicher Höhe angebrachten Pins werden durch den sich aufweitenden Zylinder kurzgeschlossen. Die dadurch resultierenden Änderungen der elektrischen Widerstände werden über die Zeit aufgezeichnet. Man erhält auch hier den Radius-Zeit-Verlauf der Ausdehnung der Kupferrohrwand an einer vorher festgelegten Stelle des Kupferzylinders.

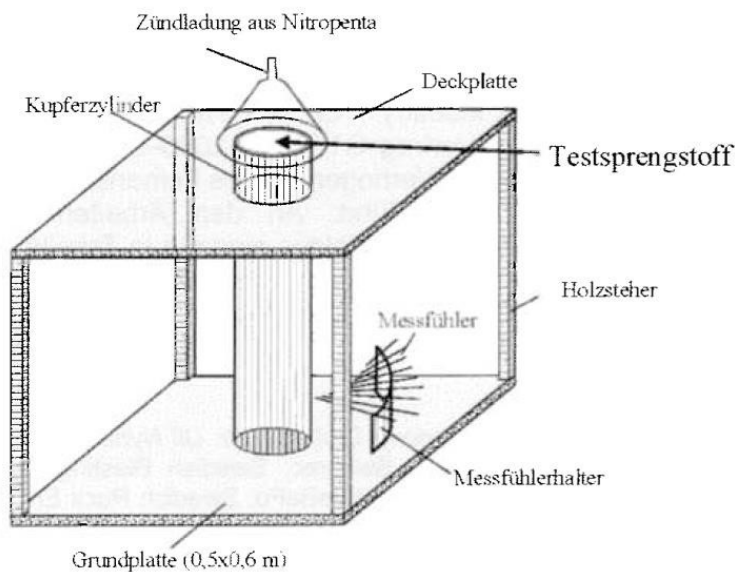


Abbildung 2.4.3: Schematischer Aufbau von Zylinderexpansionsversuchen mit Kontaktpins zur Aufzeichnung der Expansion. (OUCHTERLONY *et al.* 2003)

Im Gegensatz dazu wurde für diese Arbeit ein bildgebendes Aufnahmeverfahren eingesetzt, um die Expansion der Kupferzylinder während des Versuches aufzuzeichnen. Mit einer Ultra-Highspeedkamera „Hyper Vision HV-1“ der Firma SHIMADZU wurde das Kupferrohr auf einer Länge von ca. 20 cm während des Versuches aufgenommen. Die Kamera ist in der Lage, einen Film von bis zu 100 μ s Länge bei einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1.000.000 Bildern pro Sekunde aufzuzeichnen. Es werden also bis zu 100 Einzelaufnahmen erhalten, auf denen sowohl der radiale als auch der axiale Verlauf der Rohrexpansion infolge der Detonation zu sehen ist. Der zeitliche Abstand zwischen den Einzelbildern beträgt 1 μ s. Somit kann die Zeitachse definiert werden.

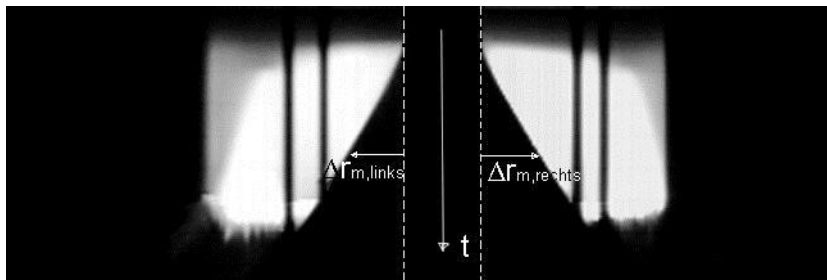


Abbildung 2.4.4: Zusammengesetzte Streakansicht aus einem Zylindertest eines gelatinösen Sprengstoffes. (BAM)

Bei Betrachtung der gleichen Zeile auf allen Einzelbildern kann die seitliche Ausdehnung des Kupferzylinders bestimmt werden. Dazu wurde eine ausgewählte Zeile aus allen Einzelaufnahmen eines Filmes extrahiert und zu einem der Streakaufnahme entsprechenden Bild zusammengefügt. Abbildung 2.4.4 zeigt eine solche zusammengefügte Streakansicht eines im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Zylindertestes. Dadurch ergibt sich, wie in den beiden anderen Verfahren, der Radius-Zeit-Verlauf der Expansion auf einer bestimmten Höhe des Kupferzylinders.

2.4.2. Bestimmung der radialen Geschwindigkeit, der GURNEY-Energie und der GURNEY-Geschwindigkeit

Bei allen drei Aufnahmeverfahren wird die Änderung des äußeren Radius der Kupferrohrwand senkrecht zur Längsachse aufgezeichnet.

Da es infolge der Expansion zu einer Verringerung der Wandstärke des Kupferzylinders kommt, wird zur Berechnung der GURNEY-Energie nicht der gemessene äußere Radius r_a , sondern der mittlere Radius r_m herangezogen (Abbildung 2.4.5).

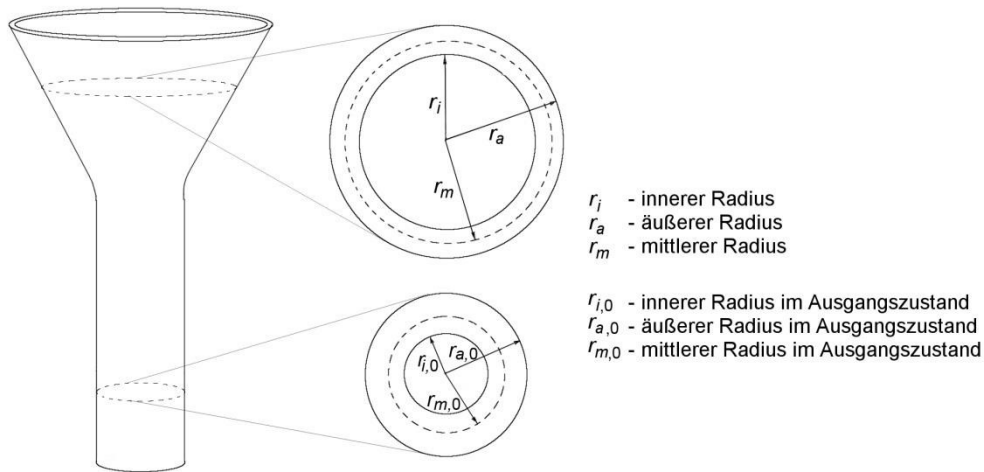


Abbildung 2.4.5: Schematische Darstellung der Radien eines expandierenden Zylinders.

Unter der Annahme, dass das Kupfergefüge während der Expansion nicht verdichtet wird und es zu keinem Fließen des Kupfers entlang der Längsachse kommt, kann der mittlere Radius r_m und auch der innere Radius r_i durch folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$r_m^2 = r_i^2 + \frac{\pi \cdot (r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2)}{2 \cdot \pi} = r_a^2 - \frac{\pi \cdot (r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2)}{2 \cdot \pi}. \quad (2.4.1)$$

(HORNBERG und VOLK 1989 u.a.)

$r_{a,0}$ und $r_{i,0}$ sind hierbei die äußeren bzw. inneren Ausgangsradien. $r_{m,0}$ ist der mittlere Radius der entsprechenden Querschnittsfläche des Ausgangszustandes. Die Änderung des mittleren Radius Δr_m mit

$$\Delta r_m = r_m - r_{m,0} \quad (2.4.2)$$

ergibt sich aus der Gleichung (2.4.1) wie folgt:

$$\Delta r_m = \sqrt{r_a^2 - \frac{r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2}{2}} - \sqrt{r_{a,0}^2 - \frac{r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2}{2}}. \quad (2.4.3)$$

Der so ermittelte Radius-Zeit-Verlauf der Zylinderexpansion folgt einer Gleichung mit einem exponentiellen und einem linearen Anteil:

$$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right). \quad (2.4.4)$$

(HORNBERG und VOLK 1989, OUCHTERLONY *et al.* 2003, 2005)

Die Zeit t wird so angepasst, dass der Radius-Zeit-Verlauf bei $t = 0 \mu\text{s}$ und $\Delta r_m = 0 \text{ mm}$ gestartet wird. A_r und B_r sind Kurvenanpassungsparameter. Der Wert von A_r entspricht dabei der maximalen Radialgeschwindigkeit $v_{m,max}$ des Kupferzylinders, d. h. der maximalen Geschwindigkeit, mit der die Kupferwand expandiert. Der Wert von B_r spiegelt die Dauer der Beschleunigungsphase der Zylinderwandexpansion wider. A_r hat die Dimension einer Geschwindigkeit, B_r hingegen die einer inversen Zeit.

Die radiale Geschwindigkeit v_m lässt sich durch die erste zeitliche Ableitung der radialen Ausdehnung ermitteln:

$$v_m = \frac{d\Delta r_m}{dt} = A_r \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}). \quad (2.4.5)$$

Die so ermittelte radiale Expansionsgeschwindigkeit senkrecht zur Detonationsachse entspricht aber nicht der tatsächlichen Geschwindigkeit der Kupferrohrwand. Die tatsächliche Geschwindigkeit der Zylinderwand v_L ist zur ermittelten Expansionsgeschwindigkeit v_m um den Winkel $\Theta/2$ in Richtung der Detonationsachse verschoben (Abbildung 2.4.6). (KENNEDY 1998)

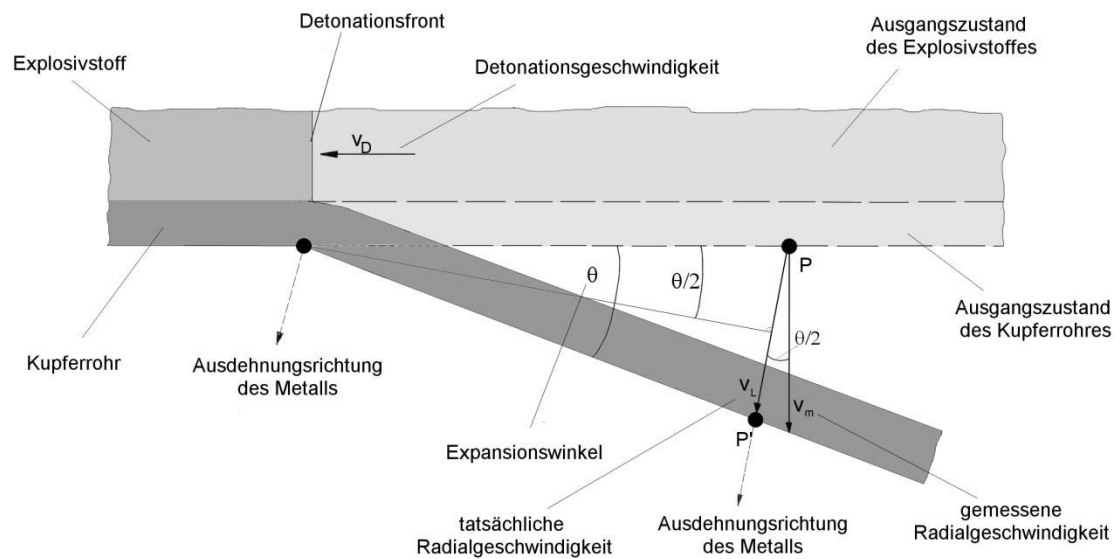


Abbildung 2.4.6: Expansion der Zylinderwand, (nach KENNEDY 1998).

Der Expansionswinkel Θ lässt sich durch Kenntnis der radialen Expansionsgeschwindigkeit v_m und der Detonationsgeschwindigkeit v_D wie folgt ermitteln:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{v_m}{v_D}\right). \quad (2.4.6)$$

Die tatsächliche Expansionsgeschwindigkeit v_L ist dann (OUCHTERLONY *et al.* 2005)

$$v_L = 2 \cdot v_D \cdot \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right). \quad (2.4.7)$$

Mit Hilfe der GURNEY-Gleichung für Zylinder

$$e_G = \frac{v_L^2}{2} \cdot \left(\frac{m_M}{m_C} + \frac{1}{2}\right) \quad (2.4.8)$$

lässt sich dann über die tatsächliche Expansionsgeschwindigkeit v_L die GURNEY-Energie der jeweiligen Sprengstoffe berechnen.

Aus den ermittelten GURNEY-Energien lassen sich danach durch den einfachen Zusammenhang

$$v_G = \sqrt{2 \cdot e_G} \quad (2.2.8)$$

die GURNEY-Geschwindigkeiten (GURNEY-Konstanten) der entsprechenden Sprengstoffe berechnen.

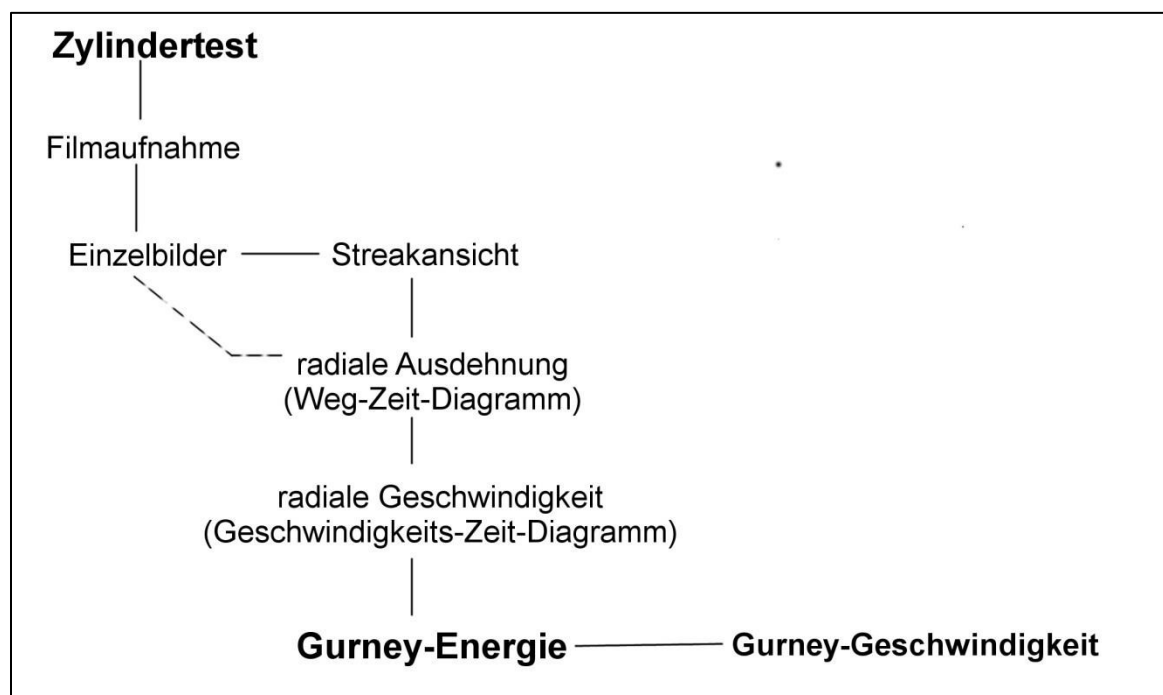


Abbildung 2.4.7 : Schematischer Zusammenhang zwischen den Zylindertestdaten und der GURNEY-Energie und -Geschwindigkeit.

Abbildung 2.4.7 fasst noch einmal schematisch den Zusammenhang zwischen den Zylindertestdaten und der Bestimmung der GURNEY-Energie und GURNEY-Geschwindigkeit zusammen.

2.4.3. Ermittlung der JWL-Parameter

2.4.3.1. Isentroper Druck der Zylinderexpansion

Die Detonationsfront bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit v_D durch das Material. In dem Bereich der beginnenden Expansion hinter der Detonationsfront erfährt die Zylinderwand eine radiale Beschleunigung a , deren Ergebnis die Ausbildung einer radial wirkenden Kraft $m_M \cdot a$ ist. Dabei ist m_M die Masse des Zylinders pro Längeneinheit.

Für den Druck p ergibt sich dadurch folgender einfacher Zusammenhang:

$$p = \frac{m_M \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot r_i} \quad (2.4.9)$$

(HORNBERG 1986, LAN *et al.* 1993)

r_i ist hier der innere Durchmesser des Metallzylinders während der Expansion. Er lässt sich durch

$$r_i = \sqrt{\left(\sqrt{r_{a,0}^2 + \frac{1}{2} \cdot (r_{i,0}^2 - r_{a,0}^2)} + \Delta r_m \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot (r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2)} \quad (2.4.10)$$

bestimmen. $r_{a,0}$ und $r_{i,0}$ sind der äußere und der innere Ausgangsdurchmesser und Δr_m die Änderung des mittleren Durchmessers.

Durch die Beschleunigung a

$$a = \frac{1}{2} \cdot \frac{dv^2}{dr_i} = r_i \cdot \frac{dv^2}{dr_i^2} \quad (2.4.11)$$

und dem daraus resultierenden Integral für die radiale Geschwindigkeit v_m

$$v_m^2 = \frac{2 \cdot \pi}{m_M} \cdot \int_{R_i}^{r_i} p \cdot dr_i^2 \quad (2.4.12)$$

erhält man die Ergebnisse für den Druckverlauf. (HORNBERG 1986, LAN *et al.* 1993)

Die Ergebnisse von WILKINS zur Erforschung des Verhaltens von Detonationsprodukten im Zylindertest zeigten, dass die Expansion der Detonationsprodukte entlang der CHAPMAN-JOUGUET-Isentropen erfolgt. (MILLER und ALEXANDER 1989) Unter der Voraussetzung, dass es zu keinem Druckverlauf entlang der radialen Ebene kommt, kann der Druck p mit dem isentropen Druck p_S der JONES-WILKINS-LEE-Zustandsgleichung gleichgesetzt werden:

$$p = p_S = A \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (2.4.13)$$

2.4.3.2. Isentrope innere Energie der Zylinderexpansion

Unter der Voraussetzung, dass die Verteilung der Dichte ρ_i der Detonationsschwaden entlang der Radialausdehnung gleichmäßig ist, es also keinen Dichtegradienten gibt, ergibt sich unter Einbeziehung der Massenerhaltung der Zusammenhang

$$\pi \cdot r_i^2 \cdot \rho_i = \pi \cdot r_{i,0}^2 \cdot \rho_0 \quad (2.4.14)$$

Hierbei sind r_i der innere Radius der Metallwand mit dem Ausgangsradius $r_{i,0}$, ρ ist die Dichte der Detonationsprodukte und ρ_0 ist die Sprengstoffdichte. Ausgehend von der von GURNEY ermittelten Gleichung 2.2.1 ergibt sich für die kinetische Energie der Schwaden e_F unter Einbeziehung der Gleichung 2.4.14 der Zusammenhang

$$e_F = \frac{1}{2} \cdot v_m^2 \cdot \int_0^{r_i} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho_i \cdot \frac{r^2}{r_i^2} \cdot dr = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_0 \cdot r_{i,0}^2 \cdot v_m^2 = \frac{m_C}{4} \cdot v_m^2 \quad (2.4.15)$$

Die kinetische Energie der Zylinderwand e_M lässt sich entsprechend der Gleichung 2.2.1 durch

$$e_M = \frac{1}{2} \cdot m_M \cdot v_m^2 \quad (2.4.16)$$

darstellen. (GURNEY 1943, REAUGH und SOUERS 2004, MILLER und ALEXANDER 1989)

Hierbei bedeuten m_M und m_C die Massen des Zylinders bzw. des Sprengstoffes pro Längeneinheit, r ist die radiale Position (mit $0 \leq r \leq r_i$), und v_m die Geschwindigkeit der Metallummantelung.

Für die totale kinetische Energie e_{tot} ergibt sich aus der Summe der kinetischen Energien e_F und e_M

$$e_{tot} = e_F + e_M = \frac{m_C}{4} \cdot v_m^2 + \frac{m_M}{2} \cdot v_m^2 = \frac{m_C}{\rho_0} \cdot e_D. \quad (2.4.17)$$

Daraus lässt sich die Detonationsenergie, d. h. die spezifische, dichtebezogene GURNEY-Energie e_D darstellen:

$$e_D = e_G \cdot \rho_0 = \frac{v_m^2}{2} \cdot \left(\frac{m_M}{m_C} + \frac{1}{2} \right) \cdot \rho_0. \quad (2.4.18)$$

(OUCHTERLONY *et al.* 2003, REAUGH und SOUERS 2004)

Die GURNEY-Energie e_G lässt sich unter Verwendung der JWLB-Beziehung der Energie bei konstanter Entropie e_S wie folgt darstellen:

$$e_G = e_{S, bei V=1} - e_S = e_{S, bei V=1} - \left(\frac{A}{R_1} \cdot e^{-V \cdot R_1} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-V \cdot R_2} + \frac{C}{\omega \cdot V^\omega} \right). \quad (2.4.19)$$

(MILLER und ALEXANDER 1989)

$e_{S, bei V=1}$ ist der Ausgangspunkt der isentropen Energie, d. h. die Energie zum Zeitpunkt der beginnenden Expansion. Für das spezifische Volumen gilt dort

$$v_i = v_0 = v_{CJ} \text{ und } V = \frac{v_i}{v_0} = 1. \quad (2.4.20)$$

Für die meisten Sprengstoffe ist es eine gute Näherung 90 % der spezifischen Anfangsenergie e_0 für $e_{S, bei V=1}$ anzunehmen. (MILLER und ALEXANDER 1989)

$$e_{S, bei V=1} = 0,9 \cdot e_0 \quad (2.4.21)$$

Die spezifische Ausgangsenergie e_0 lässt sich durch

$$e_0 = q \cdot \rho_0 \quad (2.4.22)$$

darstellen. Die Explosionswärme q kann unter Zuhilfenahme der folgenden Gleichung berechnet werden

$$q = \frac{v_D^2}{2 \cdot (\gamma^2 - 1)} = \frac{p_{CJ}}{2 \cdot (\gamma - 1)} = \frac{\rho_0 \cdot v_D^2}{2 \cdot (\gamma + 1) \cdot (\gamma - 1)}. \quad (2.4.23)$$

Der Polytropenexponent γ lässt sich durch Kenntnis der Detonationsgeschwindigkeit v_D und einem weiteren Detonationsparameter wie z. B. der Geschwindigkeit der Explosionsprodukte v_W oder dem Detonationsdruck p_D durch

$$p_D = \frac{\rho_0 \cdot v_D}{(\gamma + 1)} \quad (2.4.24)$$

bzw.

$$v_W = \frac{v_D}{(\gamma + 1)} \quad (2.4.25)$$

berechnen. (DERIBAS 2000)

Alternativ kann die theoretische Explosionswärme auch über die Bildungsenergien der Sprengstoffbestandteile $e_{B, \text{Explosivstoff}}$ und die der Explosionsprodukte $e_{B, \text{Schwaden}}$ berechnet werden.

$$q = \sum e_{B, \text{Explosivstoff}} - \sum e_{B, \text{Schwaden}} \quad (2.4.26)$$

Es wird dabei von einem isochorischen Zerfall, d. h. unter konstantem Volumen, ausgegangen. (KÖHLER und MEYER 1998)

Die spezifische innere Energie bei konstanter Entropie e_S lässt sich dann unter Zuhilfenahme der Gleichungen 2.4.19, 2.4.21 und 2.4.22 berechnen

$$e_S = e_{S, \text{bei } V=1} - e_D = \rho_0 \cdot (0,9 \cdot q - e_G). \quad (2.4.27)$$

Nach Gleichung 4.2.19 entspricht die so experimentell ermittelte Energie unter isentropen Bedingungen der JWL-Darstellung der isentropen Energie

$$e_s = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 \cdot V} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{\omega \cdot V^\omega} \quad (2.4.28)$$

2.4.3.3. "Partielles Fitting" der Druck-Volumen- bzw. Energie-Volumen-Kurven

Sowohl der isentrope Druck p_s als auch die innere Energie unter konstanter Entropie e_s sind Funktionen des Volumenverhältnisses V . Das spezifische Volumen v_i ist definiert als

$$v_i = \frac{1}{\rho_i} = 2 \cdot \pi \cdot r_i^2, \quad (2.4.29)$$

wobei ρ_i die Dichte der Sprengschwaden und r_i der innere Radius des Zylinders sind.

Somit ergibt sich für das Volumenverhältnis V

$$V = \frac{v_i}{v_0} = \frac{\rho_0}{\rho_i} = \frac{r_i^2}{r_{i,0}^2} = \frac{r_m^2 - \frac{1}{2} \cdot (r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2)}{r_{i,0}^2} \quad (2.4.30)$$

v_0 ist das Ausgangsvolumen, v_i das Volumen während der Expansion, ρ_0 die Dichte des Sprengstoffes, r_i und r_m sind der innere bzw. mittlere Radius des expandierenden Zylinders und $r_{i,0}$ und $r_{a,0}$ der innere bzw. äußere Ausgangsradius.

Wird die Druck- bzw. Energieänderung gegen das Volumenverhältnis aufgetragen, so ergeben sich die isentropen Druck-Volumen- bzw. Energie-Volumen-Kurven der Zylinderexpansion. Aus diesen Druck-Volumen- bzw. Energie-Volumen-Kurve lassen sich durch "partielltes Fitting" die JWL-Parameter ermitteln. Das bedeutet, dass die verschiedenen Terme der JWL-Gleichung nacheinander als Ausgleichsfunktion auf die Kurve angewendet werden. Pro

Ausgleichsdurchgang werden zwei der JWL-Parameter ermittelt und diese dann in die nächste Ausgleichsfunktion eingefügt.

Zunächst werden die beiden Parameter C und ω durch Fitting der Kurve mit dem rechten Term der JWL-Gleichung bestimmt.

$$p_{S,1} = \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (2.4.31)$$

bzw.

$$e_{S,1} = \frac{C}{\omega \cdot V^{\omega}} \cdot \quad (2.4.32)$$

Die erhaltenen Ergebnisse werden eingesetzt, um durch erneutes Fitting mit dem mittleren und rechten Term der JWL-Gleichung die Parameter B und R_2 zu erhalten.

$$p_{S,2} = B \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (2.4.33)$$

bzw.

$$e_{S,2} = \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{\omega \cdot V^{\omega}} \cdot \quad (2.4.34)$$

Diese vier Parameter werden nun verwendet, um mit der gesamten Gleichung die Parameter A und R_1 ebenfalls durch Fitting zu bestimmen.

$$p_{S,3} = A \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{V^{\omega+1}} \quad (2.4.35)$$

bzw.

$$e_{S,3} = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 \cdot V} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{\omega \cdot V^{\omega}} \cdot \quad (2.4.36)$$

Man erhält so die sechs Parameter der JONES-WILKINS-LEE-Zustandsgleichung, die auf Grund des partiellen Fitting-Vorganges eine unterschiedliche Gewichtung

erfahren. Dies ist notwendig, da sie unterschiedliche Bereiche des Detonationsverlaufes (*high-pressure* und *low-pressure*) beschreiben.

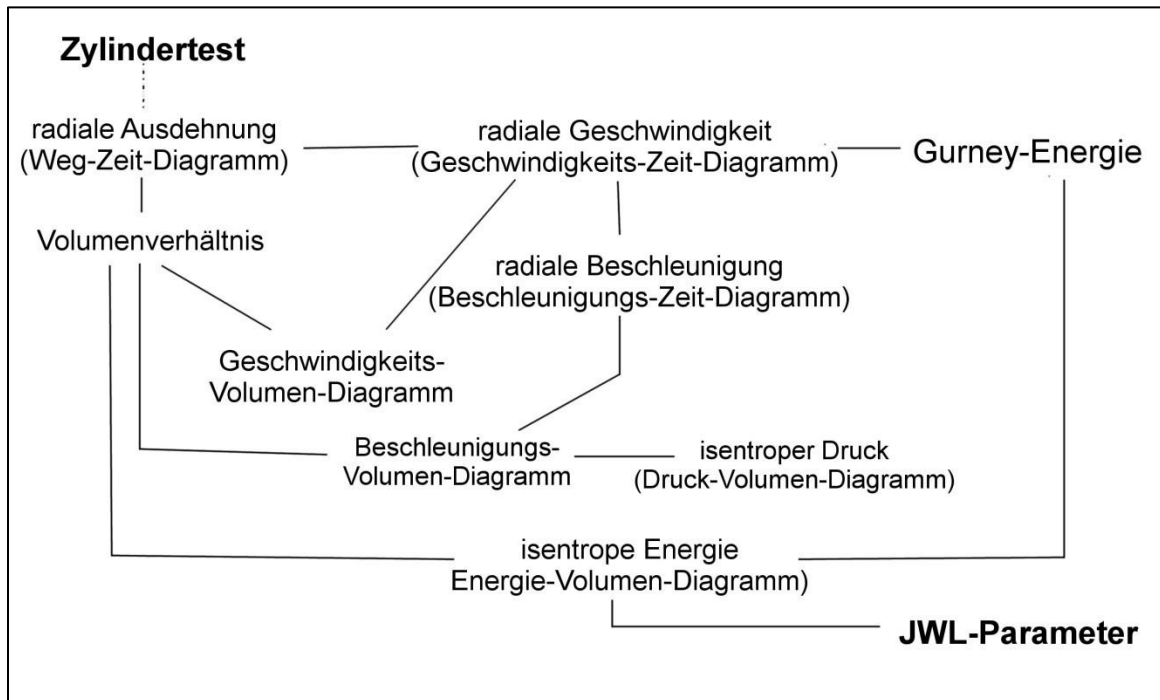


Abbildung 2.4.8 : Schematische Darstellung des Zusammenhangs der aus den Zylindertests gewonnenen Daten und der JWL-Parameter.

In der Abbildung 2.4.8 sind die Zusammenhänge der aus den Zylindertestdaten gewonnenen Diagrammdata auf dem Weg zur Bestimmung der JWL-Parameter noch einmal schematisch zusammengefasst.

2.5. Zivil genutzte Sprengstoffe

Die Einsatzgebiete von Sprengstoffen sind sehr vielfältig. Militärisch genutzte Sprengstoffe sind i. d. R. darauf ausgelegt eine bestmögliche Wirkung auf das gewünschte Objekt auszuüben. Sie zeichnen sich durch eine hohe Detonationsgeschwindigkeit und große Brisanz aus. Vorrangig kommen organische Nitroverbindungen, wie Hexogen, Oktogen oder Nitropenta, zum

Einsatz. Um die Empfindlichkeit gegenüber Schlag, Reibung oder Flammeneinwirkung zu minimieren, sind diese Sprengstoffe i. d. R. plastifiziert und phlegmatisiert. Im zivilen Bereich werden Sprengstoffe u. a. im Steinbruch, im Berg- und Tunnelbau, bei Abrissarbeiten, für Lawinensprengungen, zum Sprengplatinieren oder bei der Schockwellensynthese eingesetzt. Viele dieser zivilen Sprengstoffe sind ammoniumnitrathaltig. Diese Sprengstoffe zeichnen sich durch eine geringere Brisanz gegenüber militärischen Sprengstoffen und die hohen Schwadenvolumina, die bei der Umsetzung entstehen, aus. Aber auch im zivilen Sektor kommen hochbrisante Sprengstoffe zum Einsatz, z. B. in Zündern, Sprengschnüren, Schneidladungen oder plastifizierten Sprengstoffen. Die am häufigsten verwendeten gewerblichen Sprengstoffe sind sogenannte Gesteinssprengstoffe, die u. a. im Bergbau und Steinbrüchen eingesetzt werden. Sie lassen sich in drei große Gruppen unterteilen:

- gelatinöse Sprengstoffe
- Emulsionssprengstoffe / Sprengschlämme
- ANC-Sprengstoffe.

Gelatinöse Sprengstoffe bestehen hauptsächlich aus aliphatischen Nitroverbindungen (z. B. Glyceroltrinitrat, Ethylenglykoldinitrat) und / oder aromatischen Nitroverbindungen (z. B. Dinitrotoluol, Trinitrotoluol) sowie Ammoniumnitrat und Nitrocellulose als Geliermittel. Die bekanntesten Vertreter sind die von Alfred Nobel entwickelten Dynamite. Je nach Zusammensetzung und Einschlussbedingungen detonieren gelatinöse Sprengstoffe mit einer Geschwindigkeit von 4000 bis 6500 m/s. (KÖHLER und MEYER 1998)

Emulsionssprengstoffe setzen sich in erster Linie aus einer Wasser-in-Öl-Emulsion aus heißgesättigter Ammoniumnitratlösung, Mineralöl und einem Emulgator zusammen. Sensibilisiert wird diese Emulsionsmatrix durch winzige Gasbläschen (sogenannte *Hotspots*) mit einem Durchmesser von 50 µm bis zu 1 mm, wodurch gleichzeitig die Dichte und die Sensibilität der Emulsionssprengstoffe reguliert werden können. Diese Gasblasen können durch

Hinzufügen von Mikrohohlkörpern oder durch chemische Gasblasenbildung (*chemical gassing*) entstehen. Beim *chemical gassing* werden Chemikalien zugesetzt, die durch chemische Reaktion Gasbläschen bilden. Je nach Zusammensetzung, Einschlussbedingungen und Dichte der Emulsionssprengstoffe liegt die Detonationsgeschwindigkeit zwischen 3000 und 5500 m/s.

Emulsionssprengstoffe sind in ihrem Leistungsvermögen mit gelatinösen Sprengstoffen vergleichbar, jedoch in der Handhabung wesentlich unempfindlicher gegen Schlag und Reibung und bieten eine höhere Sicherheit während der Produktion und beim Umgang mit diesen Sprengstoffen. Ein weiterer Vorteil von Emulsionssprengstoffen gegenüber gelatinösen Sprengstoffen ist die Möglichkeit, diese direkt vor Ort in die Bohrlöcher pumpen zu können. (KÖHLER und MEYER 1998, FIEDERLING 1988)

ANC-Sprengstoffe bestehen aus Ammoniumnitrat und einem Kohlenstoffträger (englisch: Carbon). Die wohl bekanntesten ANC-Sprengstoffe sind die so genannten ANFO-Sprengstoffe (Ammoniumnitrate Fuel Oil), bestehend aus einer Mischung aus Ammoniumnitrat und mineralischem Öl. Sie sind rieselfähig und lassen sich gut in Bohrlöcher einfüllen. Die durchschnittliche Detonationsgeschwindigkeit liegt bei 2500 bis 3500 m/s. ANFO-Sprengstoffe sind unempfindlich gegen Schlag und Reibung, aber empfindlich gegenüber Wasser. Deshalb können Sie nicht wie gelatinöse Sprengstoffe oder Emulsionen in wasserführenden Bohrlöchern eingesetzt werden. (FIEDERLING 1988)

Eine spezielle Nebengruppe der gewerblich genutzten Sprengstoffe bilden die sogenannten Wettersprengstoffe. Es sind Sprengstoffe, deren Wärmeentwicklung durch Zusatz von Salzen so stark herabgesetzt wurde, dass die Auslösung von sogenannten Schlagwettern (Methan-Luft-Gemische) oder Kohlenstaubexplosionen verhindert wird. Dadurch sind diese Sprengstoffe für den Einsatz im Kohlebergbau geeignet. Wettersprengstoffe haben aufgrund ihrer

Zusammensetzung eine geringe Detonationsgeschwindigkeit von 1500 bis 2500 m/s. (KÖHLER und MEYER 1998)

Diverse Zusätze verändern die physikalischen und / oder sprengtechnischen Eigenschaften der Sprengstoffe. So erhöht z. B. zugesetztes Aluminium die Brisanz von Emulsions- oder ANC- Sprengstoffen. (KÖHLER und MEYER 1998) Die Sprengstoffindustrie hat eine Vielzahl von gewerblichen Sprengstoffen auf dem Markt gebracht, um ein breites Spektrum an Anwendungsgebieten bedienen zu können.

2.5.1. Auswahl der Sprengstoffe für die Zylindertests

Um die Anwendbarkeit der Zylindertests für zivile Sprengstoffe zu überprüfen, ist es sinnvoll, verschiedene zivil genutzte Sprengstoffe zu untersuchen. Gesteinssprengstoffe haben eine hohe wirtschaftliche Bedeutung und bilden den größten Anteil an zivil genutzten Sprengstoffen. Es wurde aus jeder der oben beschriebenen Gruppen mindestens ein Vertreter ausgewählt.

Zunächst wurde mit dem ANFO-Sprengstoff "Andex" der Firma EURO DYN SPRENGMITTEL GMBH, Würgendorf, Deutschland begonnen. ANFO-Sprengstoffe sind auf Grund ihrer Zusammensetzung gut rieselfähig. Dadurch wird das gleichmäßige Befüllen des Rohres erleichtert. Zudem sind ANFO-Sprengstoffe preiswert in der Herstellung und somit - zusammen mit Emulsionssprengstoffen - die am häufigsten zum Einsatz kommenden Sprengstoffe. Des Weiteren finden sich für die GURNEY-Energien einiger ANFO-Produkte Werte in der Literatur, so dass Vergleichswerte vorliegen. (OUCHTERLONY *et al.* 2003, 2005, HORNBERG 1986)

Der ebenfalls pulverförmige Wettersprengstoff "Wetter-Westfalit C" der Firma MAXAM DEUTSCHLAND GMBH, Doberschau-Gaußig, Deutschland wurde auf Grund

seiner rieselfähigen Eigenschaften als zweiter Sprengstoff ausgewählt. Wegen seiner stark hygroskopischen Eigenschaften waren die Wetterverhältnisse an den Versuchstagen wichtig. Die Versuche fanden an Tagen mit einer relativen Luftfeuchte von unter 40% statt. Aufgrund der geringen Detonationsgeschwindigkeit von Wettersprengstoffen sollte am Beispiel von "Wetter-Westfalit C" gezeigt werden, dass das Zylindertestverfahren auch bei sehr langsam detonierenden Sprengstoffen eingesetzt werden kann.

Weitere Versuche wurden mit Emulsionssprengstoffen durchgeführt. Emulsionssprengstoffe gehören mit zu den am häufigsten verwendeten zivilen Gesteinssprengstoffen. Sie sind sowohl patroniert erhältlich oder können auch direkt vor Ort in die Bohrlöcher gepumpt werden. Die Unempfindlichkeit gegenüber Schlag und Reibung und die Möglichkeit die sprengtechnischen Eigenschaften durch Variationen der chemischen Zusammensetzung und der Dichte zu beeinflussen, führte dazu, dass Emulsionssprengstoffe, zusammen mit den ANFO-Sprengstoffen, wirtschaftlich immer mehr an Bedeutung gewannen.

Zunächst wurde der von der Firma MAXAM DEUTSCHLAND GMBH, Schellroda, Deutschland hergestellte Emulsionssprengstoff "Emulgit 42G" untersucht. Es bot sich die Möglichkeit, den Sprengstoff im noch heißen Zustand direkt in der Produktionsstätte in die Kupferrohre abzufüllen. Dadurch sollte eine homogene Füllung der Zylinder erreicht werden.

Es folgten Versuche mit in der BAM selbst hergestellten Emulsionen. Die Emulsionen sind nach Vorgaben der Firma EURODYN SPRENGMITTEL GMBH, Würzburg, Deutschland hergestellt worden. Die Emulsionsmatrizen hatten alle die gleiche chemische Zusammensetzung. Durch unterschiedliche Mengen an gasbildenden Chemikalien variierten die Emulsionssprengstoffe ("Emu") in der Dichte. Der Teil der Emulsionsmatrizen, der nicht durch die chemische Gasblasenbildung sensibilisiert wurde, wurde mit ca. einem Volumenprozent Mikrohohlkugeln der Firma 3M sensibilisiert ("Dumbo").

Weitere Versuche wurden mit "Supergel 30" der Firma MAXAM DEUTSCHLAND GMBH, Döberschau-Gaußig, Deutschland durchgeführt. Es handelt sich dabei um

einen gelatinösen Sprengstoff. Um die mechanische Belastung beim homogenen Einfüllen in das Kupferrohr so gering wie möglich zu halten, sollte der Patronendurchmesser des Sprengstoffes annähernd dem Innendurchmesser der Kupferzylinder entsprechen. "Supergel 30" wurde untersucht, da er in Patronen mit ca. 37 mm Durchmesser erhältlich ist. Und durch die pastöse Konsistenz des Sprengstoffes konnte eine homogene Füllung des Kupferrohres realisiert werden.

TNT ist als militärischer Sprengstoff bezüglich seiner GURNEY-Energie mehrmals untersucht worden. (CATANACH *et al.* 1999 u. a.) Um Vergleichswerte zu erhalten und die Methode überprüfen zu können, wurden Versuche mit geschuppten recycelten TNT der Firma ELOVITZA JSC, Gabrovo, Bulgarien durchgeführt. Dieser Sprengstoff war in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung von früheren Versuchen vorhanden.

Abschließend wurden Versuche mit einem Testsprengstoff der Firma MBDA-TDW GESELLSCHAFT FÜR VERTEIDIGUNGSTECHNISCHE WIRKSYSTEME MBH, Schrobenhausen, Deutschland vorgenommen. Es handelt sich um einen hexogenhaltigen Sprengstoff, der in Blöcken vorliegt. Durch mechanische Bearbeitung ist ein passgenaues Einführen in die Kupferrohre möglich. Die MBDA-TDW realisiert selbst Zylindertests zur Untersuchung militärischer Sprengstoffe, nutzt aber eine andere Aufnahmetechnik mit einer Drehspiegel-Streakkamera. In Zusammenarbeit mit Dr. ARNOLD *et al.*, MBDA-TDW konnten so die GURNEY-Energie und die GURNEY-Geschwindigkeiten für diesen Testsprengstoff mit zwei unterschiedlichen Aufnahmemethoden gewonnen werden. So war ein Vergleich der hier entwickelten Methode mit der klassischen Streaktechnik möglich.

Tabelle 2.2 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Sprengstoffe im Überblick.

Tabelle 2.2: Überblick über die untersuchten Sprengstoffe

Name des Sprengstoffes	Art des Sprengstoffes	Firma
Andex	ANFO-Sprengstoff	EURODYN SPRENGMITTEL GMBH
Wetter-Westfalit C	Wettersprengstoff	MAXAM DEUTSCHLAND GMBH
Emulgit 42G	Emulsionssprengstoff	MAXAM DEUTSCHLAND GMBH
Emu	Emulsionssprengstoff	BAM, nach Vorgaben der EURODYN SPRENGMITTEL GMBH
Dumbo	Emulsionssprengstoff	BAM, nach Vorgaben der EURODYN SPRENGMITTEL GMBH
Supergel 30	gelatinöser Sprengstoff	MAXAM DEUTSCHLAND GMBH
TNT	einheitlicher Sprengstoff	ELOVITZA JSC
Testsprengstoff	militärischer Sprengstoff	MBDA-TDW GESELLSCHAFT FÜR VERTEIDIGUNGSTECHNISCHE WIRKSYSTEME MBH

3. Experimenteller Teil

3.1. Aufbau der Zylindertestversuche

Die Abbildung 3.1.1 stellt den in dieser Arbeit verwendeten schematischen Aufbau der Zylinderexpansionsversuche dar.

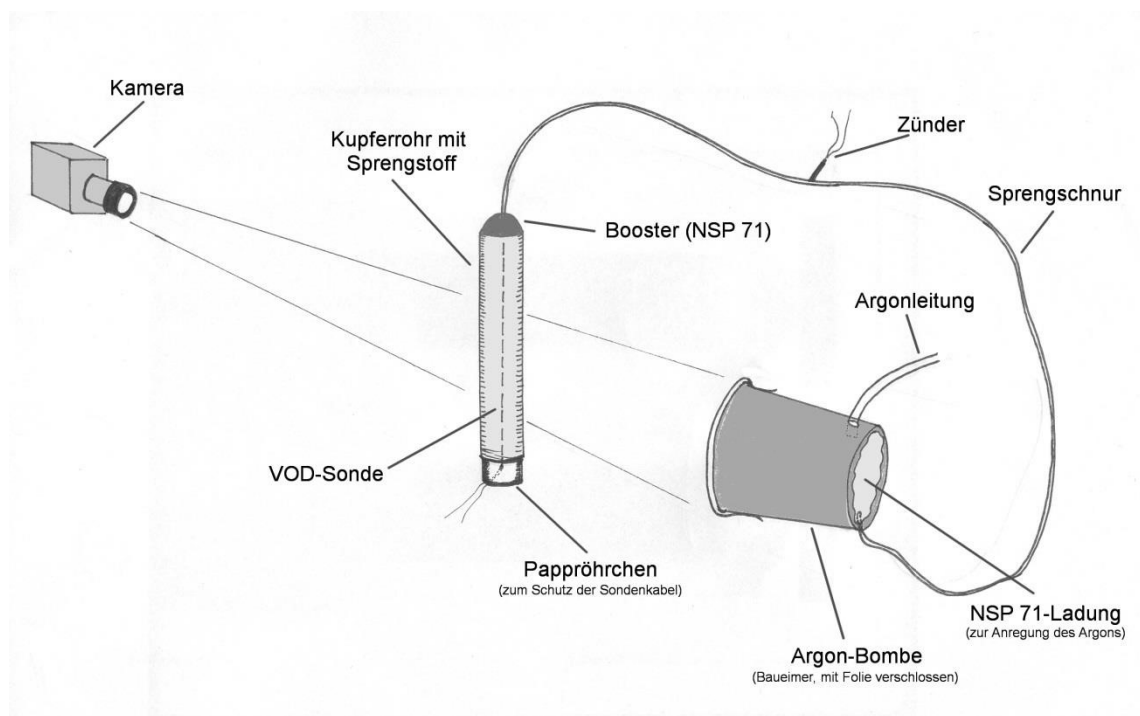


Abbildung 3.1.1: Schematischer Aufbau eines Zylinderrohrtests.

Der zu untersuchende Sprengstoff wurde homogen in ein Kupferrohr geführt und am oberen Ende durch eine Verstärkerladung (Booster) gezündet. Die Detonation lief senkrecht durch den Kupferzylinder. Die seitliche, also radiale, Ausdehnung des Zylinders infolge der Detonationswirkung wurde mit einer Ultra-Highspeedkamera „Hyper Vision HV-1“ der Firma SHIMADZU aufgezeichnet. Die Beleuchtung erfolgte von hinten mit einer sogenannten Argonbombe, initiiert durch eine weitere Verstärkerladung. Dadurch wurde die Rohraufweitung als Schattenriss aufgezeichnet. Die Synchronisation der Rohrdetonation und der Beleuchtung erfolgte durch eine Sprengschnur, die durch einen handelsüblichen

Zünder initiiert wurde. Während der Versuche wurde die Detonationsgeschwindigkeit durch eine mittig im Sprengstoff eingebrachte Sonde gemessen.

Die Abbildung 3.1.2 und Abbildung 3.1.3 zeigen den Aufbau vor Ort.



Abbildung 3.1.2: Aufbau eines Zylinderrohrtests (von vorne).

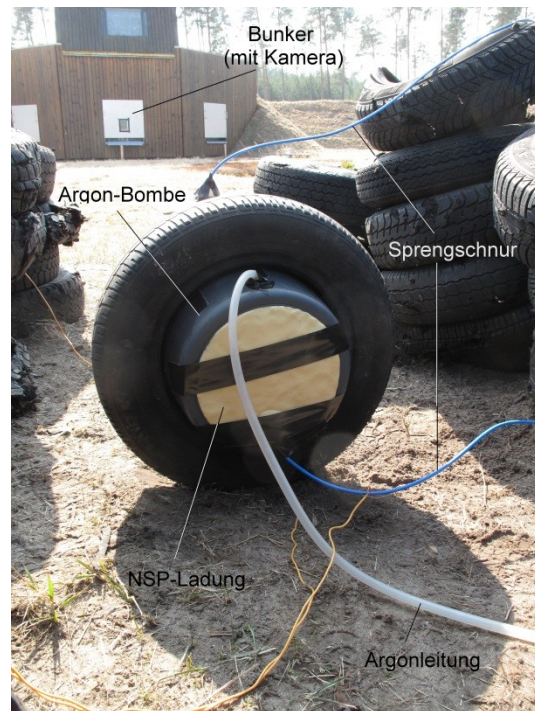


Abbildung 3.1.3: Aufbau eines Zylinderrohrtests (von hinten).

Der zu untersuchende Sprengstoff wurde möglichst homogen in ein Kupferrohr gefüllt. Die losen Sprengstoffe ("Andex", "Wetter-Westfalit C", TNT) wurden dafür in das Rohr geschüttet und durch leichtes aufstampfen gleichmäßig verteilt. Die Emulsionssprengstoffe wurden ebenfalls mittels leichten Aufstampfens gleichmäßig eingefüllt. Im Falle der selbst hergestellten Emulsionen ohne Mikrohohlkörper fand die Gasentwicklung erst nach dem Einfüllen statt, so dass der Sprengstoff sich homogen verteilen konnte. Der Emulsionssprengstoff "Emulgut 42G" wurde direkt in der Produktionsstätte im noch heißen Zustand eingefüllt. Der gelatinöse Sprengstoff "Supergel 30" wurde in kleinen Portionen in das Rohr gefüllt und vorsichtig durch leichten Druck eingepresst. Der

Testsprengstoff wurde von der Firma MBDA-TDW zylinderförmig gegossen und durch mechanische Bearbeitung passgenau an das Kupferrohr angepasst und eingeklebt.

Es wurde ein niedrig legiertes, sauerstofffreies Kupfer aus der Legierung SE-Cu (nach DIN EN 1787) verwendet. Die Kupferrohre hatten eine Länge von 500 mm, einen äußeren Durchmesser von 50 mm und eine Wandstärke von 5 mm. Eine Ausnahme bildeten die Rohre für den Testsprengstoff der Firma MBDA-TDW. Dort wurden Rohre mit einem äußeren Durchmesser von 60 mm verwendet, um den kritischen Durchmesser des Sprengstoffes zu überschreiten. Alle Kupferrohre wurden vor den Versuchen bei ca. 500 °C für ein bis eineinhalb Stunden weich geglüht. Dadurch wurde das Gefüge des Kupfers entspannt und eventuell bei der Herstellung oder dem Transport entstandene Spannungen minimiert. Auf diese Weise wurde eine gleichmäßige Duktilität erzeugt und eine gleichförmige Aufweitung des Kupfers gewährleistet. Der bei dem Weichglühen entstandene Zunder (Kupferoxid) wurde oberflächlich entfernt, jedoch nur soweit dass die dunkle Färbung erhalten blieb. Dadurch hob sich das Rohr auf den Filmaufnahmen noch kontrastreicher von der Hintergrundbeleuchtung ab. Die senkrechte Ausrichtung des Rohres erfolgte mit einer Wasserwaage. Auf diese Weise konnte das nachträgliche Drehen der Filmaufnahmen, um das Rohr senkrecht auf den Aufnahmen darzustellen, vermieden werden. Dies war bei den ersten Aufnahmen, bei denen das Rohr nicht ausgerichtet wurde, noch nötig.

Ein einfaches Holzgestell diente der Stabilisierung des Rohres. Zunächst befand sich die Halteplatte am oberen Ende des Rohres. Später wurden die Beinchen soweit gekürzt, dass sich die Halteplatte im unteren Viertel des Rohres befand. Auf diese Weise waren die Holzstäbchen, die als Beinchen dienten, nicht mehr im Bild zu sehen. So konnten sie auch bei starken Rohraufweitungen die Ergebnisse nicht beeinträchtigen. Zunächst diente die Halteplatte aber auch dazu, einen Teil der durch die Detonation der Sprengschnur entstandenen Schwaden aus dem Bild zu halten. Durch Herabsetzen der Platte wurde es erforderlich, ein Stück Pappe anzubringen, um ein Verdunkeln der Aufnahme durch die Sprengschnurschwaden zu verringern.

Der zu untersuchende Sprengstoff wurde mit einer Verstärkerladung von 50 g "NSP 711" (Sprengstoff aus plastifiziertem PETN, ehemals "NSP 71") gezündet. Dieser kegelförmig geformte Booster wurde über eine durch einen handelsüblichen Zünder initiierte kunststoffummantelte Sprengschnur mit einer Aufladung von 12 bis 24 g/m PETN gezündet. Der Booster wurde auch bei Sprengstoffen verwendet, die durch Sprengschnur initiiert sind. So wurde nicht nur der Aufbau beibehalten, sondern auch die Beiladung der Sprengschnur innerhalb des Rohres vermieden. Andernfalls wäre die Homogenität des zu untersuchenden Sprengstoffes im Rohr nicht gewährleistet gewesen.

Beleuchtet wurde das Rohr von hinten mittels einer Argon-Bombe. Auf diese Weise entstand eine Art Schattenriss der Rohraufweitung.

Als Argon-Bombe diente ein handelsüblicher Baueimer mit einem Volumen von ca. 20 l. Die zum Rohr gerichtete offene Seite wurde mit einer herkömmlichen Baufolie verschlossen. Die Stoßanregung des Argongases erfolgte über eine flächige Ladung von 650 bis 750 g "NSP 711" am Boden des Eimers, die durch die gleiche Sprengschnur wie der Booster auf dem Rohr initiiert wurde. Durch einen kontinuierlich eingeleiteten Argonstrom von 1,0 bis 1,5 bar Überdruck wurde sichergestellt, dass sich während des Versuches eine ausreichende Argonmenge im Baueimer befand.

Die verwendete Sprengschnur diente nicht nur der Initiierung des Boosters und der Argonbombe, sondern auch gleichzeitig der Synchronisierung der Detonation und des Lichtes. Durch die sehr gleichmäßige Aufladung der Sprengschnur konnte der optimale Punkt des Zünders berechnet werden. Die zeitliche Verzögerung zwischen Rohraufweitung und Anregung der Argonbombe konnte bis auf einige Mikrosekunden genau ermittelt werden.

Die Kamera stand in einer Entfernung von 50 bis 60 m geschützt in einem Beobachtungsbunker. Bei späteren Versuchen konnte die Entfernung durch zusätzliche Schutzmaßnahmen auf ca. 17 m verringert werden. Die Triggerung der Kamera erfolgte anfänglich über eine dünne Zerreißsonde, die durch die Sprengschnur kurz vor Anregung des Argons ausgelöst wurde. Später diente eine optische Fotozelle zur Triggerung der Kamera. Die Auslöseschwelle der

Fotozelle wurde so eingestellt, dass der Beginn der Filmaufnahme mit der ersten Anregung des Argons gestartet wurde, nicht aber vom Tageslicht ausgelöst werden konnte. Auf diese Weise war eine bessere Ausnutzung der Leuchtdauer der Argonbombe möglich.

Die Kamera wurde so ausgerichtet, dass das Rohr auf einer Höhe von 25 bis 30 cm von der Oberkante des Rohres aus aufgenommen wurde. So konnte sich die Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes voll entwickeln und eine eventuelle „Übersteuerung“ durch den Booster abklingen. Bei einigen Versuchen wurde eine Markierung mit einem dünnen Faden auf einer Höhe von 25 cm angebracht, um zu zeigen, dass ein paar wenige Zentimeter Höhenunterschied keinen Einfluss auf die Aufnahmen zur Folge hat.

Über eine von unten nach oben möglichst mittig im Rohr eingeführte Kurzschlusssonde konnte während der gesamten Detonationszeit des Rohres die Detonationsgeschwindigkeit kontinuierlich gemessen werden. Die Sonde wurde durch die Detonationswirkung in der gleichen Geschwindigkeit kurzgeschlossen, mit der sich die Detonationsfront durch den Sprengstoff bewegte. Die durch diese Widerstandsänderung hervorgerufene Spannungsänderung bei konstantem Messstrom wurde über die Zeit gemessen. Bei Kenntnis der Sondenlänge kann somit der Weg-Zeit-Verlauf der Detonationsfront bestimmt und die Detonationsgeschwindigkeit durch lineare Regression ermittelt werden.

Die in den Abbildungen 3.1.2 und 3.1.3 erkennbaren Reifenstapel dienten dem Schutz vor umherfliegenden Kupfersplittern.

3.1.1. Die Beleuchtung

Die Highspeedkamera benötigt bei der hohen Aufnahmegeschwindigkeit von einer Million Bildern pro Sekunde helles Licht. Normales Tageslicht ist nicht ausreichend. Es wurde also eine zusätzliche Lichtquelle benötigt. Handelsübliche Leuchtmittel sind nicht geeignet, da diese mit Wechselstrom betrieben werden, das Licht also nicht kontinuierlich abgegeben wird. Dadurch ist nicht

gewährleistet, dass sich der Zeitpunkt der Aufnahme in einer "Lichtphase" befindet.

In zahlreichen Vorversuchen wurden diverse Möglichkeiten zur Beleuchtung der Versuche ausprobiert. Versuche mit einer leistungsstarken Blitzlichtanlage brachten wenig Erfolg. Zum Schutz der Anlage wurde der Blitz über Spiegel zum Kupferzylinder geleitet. Auch die Filmaufnahmen fanden über senkrecht angebrachte Spiegel statt. Aber neben der daraus resultierenden optischen Verzerrung war auch die Intensität des ankommenden Lichtes zu gering. Auch wurde bei den Versuchen festgestellt, dass der Kondensator der Blitzanlage nicht gleichmäßig, sondern leicht zyklisch entladen wird. Das ankommende Licht „flackerte“ zu stark um eine sinnvolle Auswertung der Aufnahmen zu gewährleisten.

Es stellte sich bald heraus, dass die einfache und kostengünstige Variante der Beleuchtung mit so genannten Argon-Bomben die effektivste Lichtquelle darstellt. Diese finden auch bei der zuvor erwähnten Streakaufnahmetechnik Anwendung.

Argon-Bomben sind Behälter, die mit Argongas gefüllt sind. Die Vorderseite besteht aus einer lichtdurchlässigen Abdeckung. Auf der Rückseite wird die Argon-Bombe durch eine Sprengstoffladung initiiert. Aufgrund der Stoßwelle, die sich durch das Argon bewegt werden die Außenelektronen der Gasmoleküle angeregt. Beim Zurückfallen in den energetischen Ausgangszustand wird ein helles, weißes Licht emittiert. Die einatomigen Edelgase Xenon und Krypton würden ein helleres Licht abgeben. (CHÉRET 1993) Aber aus wirtschaftlichen Gründen wird das weitaus preiswertere Argon bevorzugt.

Die Lichtintensität von Argon ist im Fall der Zylinderrohrtests ausreichend. Im vorliegenden Fall musste die Lichtintensität sogar mit einem Graufilter abgeschwächt werden, um den empfindlichen CMOS-Sensor der Hochgeschwindigkeitskamera nicht zu gefährden. Dadurch resultieren zwar geringere Kontrastabstufungen, aber durch Einsatz des Graufilters konnte auch ein Überstrahlen an den Außenkanten des Kupferzylinders verringert werden.

Es wurden mehrere Möglichkeiten der Behälter für das Argon getestet. Sowohl Luft- und Wetterballons in unterschiedlichen Größen, aber auch Pappröhren, mit

und ohne Reflektor wurden ausprobiert. Die Ergebnisse waren wenig zufrieden stellend. Das Argon leuchtete entweder nur wenige Mikrosekunden lang oder wurde zu früh von entstandenen Schwaden verdunkelt. Als geeignete Behälter für das Argon stellten sich handelsübliche 20 Liter-Baueimer, die mit einer lichtdurchlässigen Baufolie verschlossen wurden, heraus.

Die Streakaufnahmen werden üblicherweise als Schattenriss-Aufnahmen aufgezeichnet. Auch die in dieser Arbeit durchgeführten Zylindertests wurden als Schattenriss aufgenommen. Es fanden auch Versuche statt, das Rohr von vorne zu beleuchten. Allerdings waren diese Versuche aufgrund der geringen Intensität des vom Rohr reflektierten Lichtes erfolglos und die Filmaufnahmen nicht auswertbar. Auch der Einsatz von reflektierender Farbe auf dem Zylinder konnte dieses Problem nicht beheben.

3.2. Weiterführende Untersuchungen

3.2.1. Röntgenaufnahmen

Zur Überprüfung der Homogenität der eingefüllten Sprengstoffe wurden exemplarisch von vier gefüllten Rohren Röntgenaufnahmen erstellt (Abbildungen 3.2.1 bis 3.2.4).

Wie in Abbildung 3.2.1 bis 3.2.3 zu erkennen ist, sind die BAM-Emulsion und die Sprengstoffe "Supergel 30" und "Andex" homogen verteilt. Die Lufteinschlüsse beim "Andex" und bei der BAM-Emulsion ("Emu") ergeben sich durch die Beschaffenheit der Sprengstoffe selbst. ANFO-Sprengstoffe wie "Andex" bestehen aus kleinen Ammoniumnitratprills, die naturgemäß beim Einfüllen Zwischenräume bilden. Bei dem Emulsionssprengstoff sind kleine Luftblasen zur Sensibilisierung der Matrix eingeschlossen. Sie sind Bestandteil des Sprengstoffes. Beide Sprengstoffe sind dennoch homogen im Rohr verteilt. Beim gelatinösen Sprengstoff "Supergel 30" sind leichte Ringe erkennbar. Diese

rühren von der Art des Einfüllvorganges her, bei dem kleinere Sprengstoffzylinder aufgeschichtet und jeweils vorsichtig fest gedrückt wurden. Auch dieser Sprengstoff kann als gleichmäßig ins Kupferrohr eingefüllt angesehen werden.

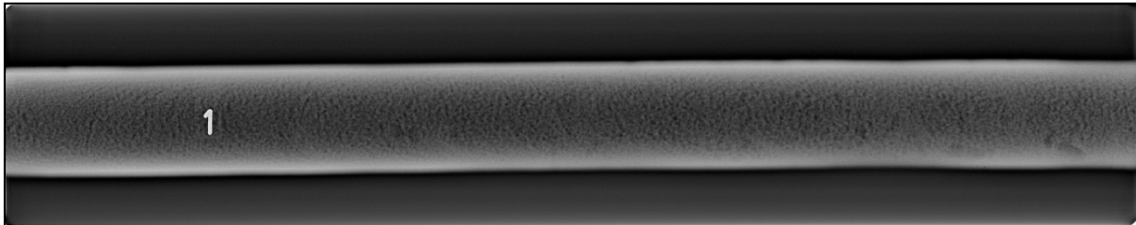


Abbildung 3.2.1: Röntgenaufnahme eines mit einer BAM-Emulsion ("Emu") gefüllten Kupferrohres.(BAM)

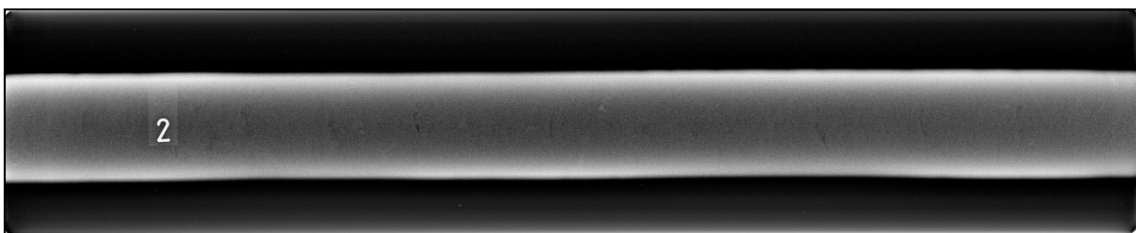


Abbildung 3.2.2: Röntgenaufnahme eines mit "Supergel 30" gefüllten Kupferrohres. (BAM)

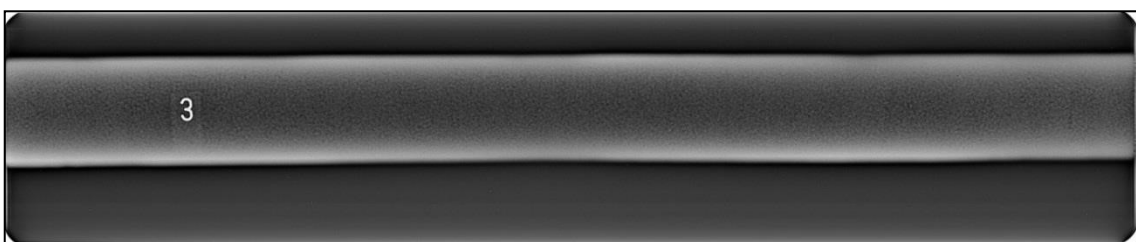


Abbildung 3.2.3: Röntgenaufnahme eines mit "Andex" gefüllten Kupferrohres. (BAM)

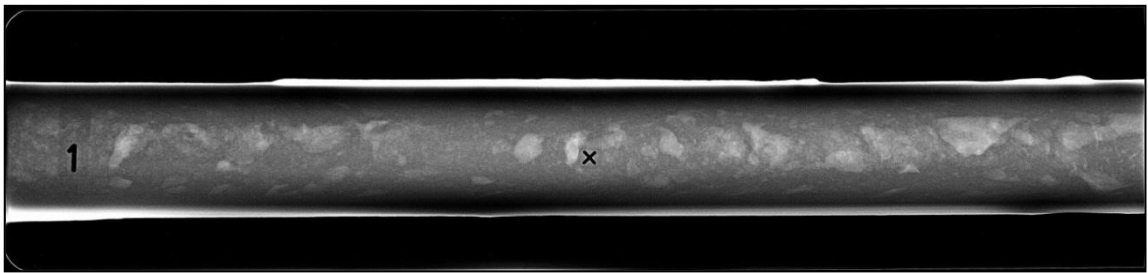


Abbildung 3.2.4: Röntgenaufnahme eines mit "Emulgit 42G" gefüllten Kupferrohres. (BAM)

Der in Abbildung 3.2.4 dargestellte Emulsionssprengstoff "Emulgit 42G" weist dagegen deutlich erkennbare Lufteinschlüsse von bis zu anderthalb Zentimeter Durchmesser auf. Diese resultieren vermutlich aus der Volumenverringering während der Abkühlung. Dies bedeutet, dass der Gassingvorgang zum Zeitpunkt der Abfüllung bereits weitestgehend abgeschlossen war und eine Volumenvergrößerung durch Dichteverringering nicht mehr statt fand.



Abbildung 3.2.5: "Emulgit 42G" im Kupferrohrzylinder.

Dieser Sprengstoff kann nicht als homogen eingefüllt angesehen werden. Dies zeigte sich schon bei der Betrachtung des Rohres (Abbildung 3.2.5). Auch bei der Auswertung der Filmaufnahmen war die Auswirkung der Inhomogenität zu erkennen. Die Reproduzierbarkeit der radialen Ausdehnung ist weder innerhalb eines Rohres noch zwischen unterschiedlichen Versuchen gegeben. Die Streuung ist so groß, dass eine sinnvolle Auswertung nicht möglich ist.

3.2.2. Messung der Detonationsgeschwindigkeit

Die Detonationsgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der die Detonationsfront in einem Sprengstoff fortschreitet, ist in den verwendeten Kupferrohren eine andere als in Stahlrohren oder ohne Einschluss. Aus diesem Grund wurde bei jedem Versuch die Detonationsgeschwindigkeit gemessen.

Eine kontinuierliche Messung hat gegenüber einer Start-Stop-Methode den Vorteil, dass Einflüsse wie das „Übersteuern“ durch die Verstärkerladung oder eine längere Anlaufstrecke des Sprengstoffes erkannt und berücksichtigt werden können. Deshalb wurden in dieser Arbeit sogenannte Kurzschlusssonden zur Messung der Detonationsgeschwindigkeit eingesetzt.

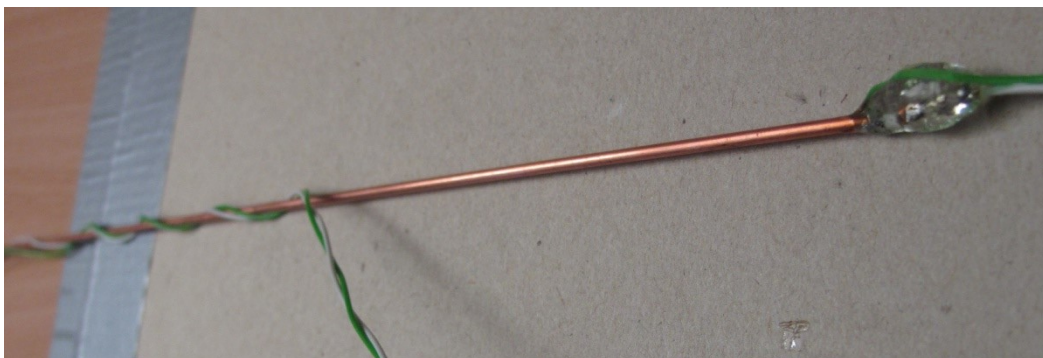


Abbildung 3.2.6: Kurzschlusssonde zur Messung der Detonationsgeschwindigkeit.

In der 3.2.6 ist eine solche Kurzschlusssonde dargestellt. Diese Sonden bestehen aus einem sehr dünnen, mit Nylon umwickelten Kupferdraht, der in einem dünnen Kupferrohr eingebracht wurde (Abbildung 3.2.7). Durch Zusammendrücken an einem Ende entsteht so ein Kontakt zwischen dem inneren Draht und der äußeren Kupferhülle (Abbildung 3.2.8), so dass eine Sonde mit einem definierten elektrischen Widerstand entsteht. Dieser lag bei den hier verwendeten Sonden bei ungefähr $140\ \Omega$. An den beiden Kontakten (innerer Draht und äußeres Kupferröhrchen) wurde eine Messleitung angebracht, an der eine Ausgangsspannung von ca. 5 V anlag.

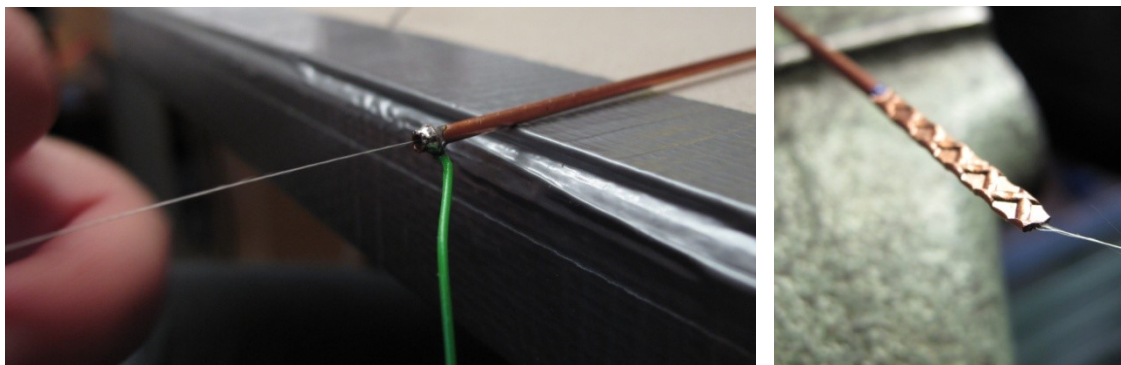


Abbildung 3.2.7 und 3.2.8: Detailaufnahmen der Sondenfertigung.

Die Sonden wurden möglichst mittig in den im Kupferzylinder befindlichen Sprengstoff eingebracht. Je nach Sprengstofftyp wurden sie entweder vorher in der Zylindermittte fixiert und dann der Sprengstoff eingefüllt oder nach der Sprengstoffeinfüllung vorsichtig hineingeschoben. Die Sondenlänge entsprach der Länge der Kupferrohre, also 500 mm. Durch die Detonationswirkung wird das äußere Kupferröhrchen der Sonde so stark zusammengedrückt, dass es zu einem Kurzschluss mit dem inneren Draht kommt. Dadurch ändert sich der Widerstand der Sonde. Bei einem konstanten Messstrom ändert sich somit auch die Spannung. Durch Kenntnis der Sondenlänge und des Ausgangswiderstandes lässt sich dann durch lineare Regression der zeitabhängigen Spannungs- bzw. Widerstandsänderung die Detonationsgeschwindigkeit ermitteln. Zur Aufzeichnung kamen aus technischen Gründen mehrere Geräte zum Einsatz.

Dies waren zum einen die VoD-Messgeräte „Supertrap“ und „Minitrap“ der Firma MREL GROUP OF COMPANIES LIMITED inklusive dazugehöriger Auswertungssoftware, zum anderen ein Transientenrekorder der Firma TRANSAS, ebenfalls mit dazugehöriger Auswertungssoftware.

Abbildung 3.2.9 zeigt den Ausdruck eines Weg-Zeit-Diagrammes einer Messung der Detonationsgeschwindigkeit eines Versuches mit "Wetter- Westfalit C".

Man kann bei den ersten 15 – 20 cm deutlich die Übersteuerung durch den Booster erkennen. Die Detonationsgeschwindigkeit, also die Steigung der Kurve ist hier deutlich höher. Die Steigung zwischen 20 und 45 cm ist nahezu konstant und spiegelt die tatsächliche Detonationsgeschwindigkeit wider.

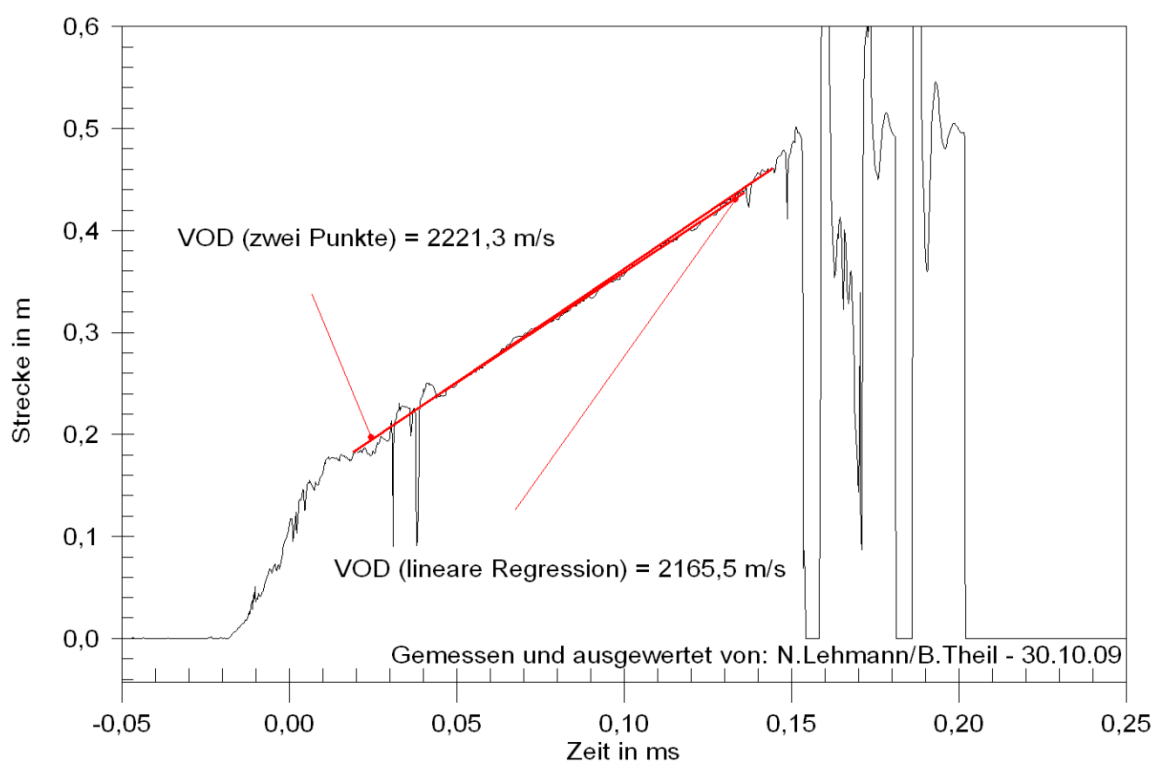


Abbildung 3.2.9: Weg-Zeit-Diagramm einer Geschwindigkeitsmessung von "Wetter-Westfalit C".

Tabelle 3.1 zeigt die mittleren Detonationsgeschwindigkeiten der jeweiligen Sprengstoffe, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden.

Tabelle 3.1: mittlere Detonationsgeschwindigkeiten der einzelnen Sprengstoffe im Zylinderrohrtest

Sprengstoff	Detonations- geschwindigkeit v_D [km/s]
Andex	3,98
Wetter-Westfalit C	2,34
Emu (Emulsion, <i>chemical gassing</i>)	3,6 bis 5,7
Dumbo (Emulsion, Mikrohohlkugeln)	5,6 bis 5,8
Emulgit 42G	4,18
TNT, geschuppt	4,94
Supergel 30	5,74

Auch wenn die Methode der kontinuierlichen Messung viele Einflüsse erkennen und berücksichtigen lässt, so zeigt doch die jahrelange Erfahrung in der BAM, dass nur eine Genauigkeit von maximal 100 m/s möglich ist.

3.2.3. Splitterbild

Bei den Zylinderexpansionsversuchen konnte ein Teil des eingesetzten Kupfers geborgen werden. Da eine große Anzahl der entstanden Kupfersplitter von den Reifen aufgehalten wurde bzw. in den Sand eingedrungen war, lag die Wiederfindungsrate der Kupfersplitter, die den jeweiligen Versuchen zugeordnet

werden konnten, nur bei 20 - 30 %. Es fiel auf, dass sich die Größe und Beschaffenheit der Splitter je nach eingesetztem Sprengstoff unterschieden. Dieses Ergebnis der Zylindertests hat keinen Einfluß auf die Aufgabenstellung dieser Arbeit, ist es aber dennoch wert, erwähnt zu werden. Zumal es Untersuchungen von MOTT (1943, 1947) und GRADY (2006) gibt, die sich mit der Fragmentierung von zylinderförmigen Sprengladungen beschäftigen. Da es sich dabei um militärische Forschungsarbeiten handelte, wurden nur stahlummantelte Sprengladungen hinsichtlich ihrer Splittergröße untersucht. Ob diese Ergebnisse auch bei Kupferzylindern Anwendung finden können, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr untersucht werden. Mit der Betrachtung einiger Splitter, hinsichtlich ihrer Größe und Form soll dennoch ein Einblick in die für die einzelnen Sprengstofftypen charakteristischen Splitterbilder gegeben werden. Die Ausmessung einzelner Splitter erfolgte exemplarisch an einer Auswahl von 20 - 30 charakteristischen Splittern pro Sprengstofftyp.

Abbildung 3.2.10 zeigt eine Auswahl typischer Splitter eines Zylindertests mit dem ANFO-Sprengstoffes "Andex". Hier waren die gefundenen Splitter entweder länglich mit einem durchschnittlichen Seitenverhältnis von ungefähr 1 : 3 bis 1 : 5 und einer Länge von 30 bis 50 mm oder oval mit einem Seitenverhältnis von ungefähr 1 : 2 bei einer Länge von 15 bis 25 mm. Die Abrisskanten waren glatt, dünn und scharfkantig. Die mittlere Stärke der Splitter lag bei 2,0 bis 2,4 mm.

Die einzelnen Emulsionssprengstoffe unterschieden sich in ihrem Splitterbild kaum. Sowohl bei den in der BAM hergestellten Emulsionssprengstoffen "Emu" (sensibilisiert durch *chemical gassing*) und "Dumbo" (sensibilisiert durch Mikrohohlkörper) als auch bei dem Emulsionssprengstoff "Emulgit 42G" waren die Splitter länglich, mit einem Seitenverhältnis von 1 : 1,5 bis 1 : 3. Die Länge der Splitter variierte zwischen 15 und 40 mm. Vereinzelte Splitter waren länger. Die Stärke der Splitter lag ebenfalls zwischen 2,0 und 2,4 mm.

Bei diesen Splittern waren die Kanten entweder glatt, dünn und scharfkantig oder breit und stumpf.

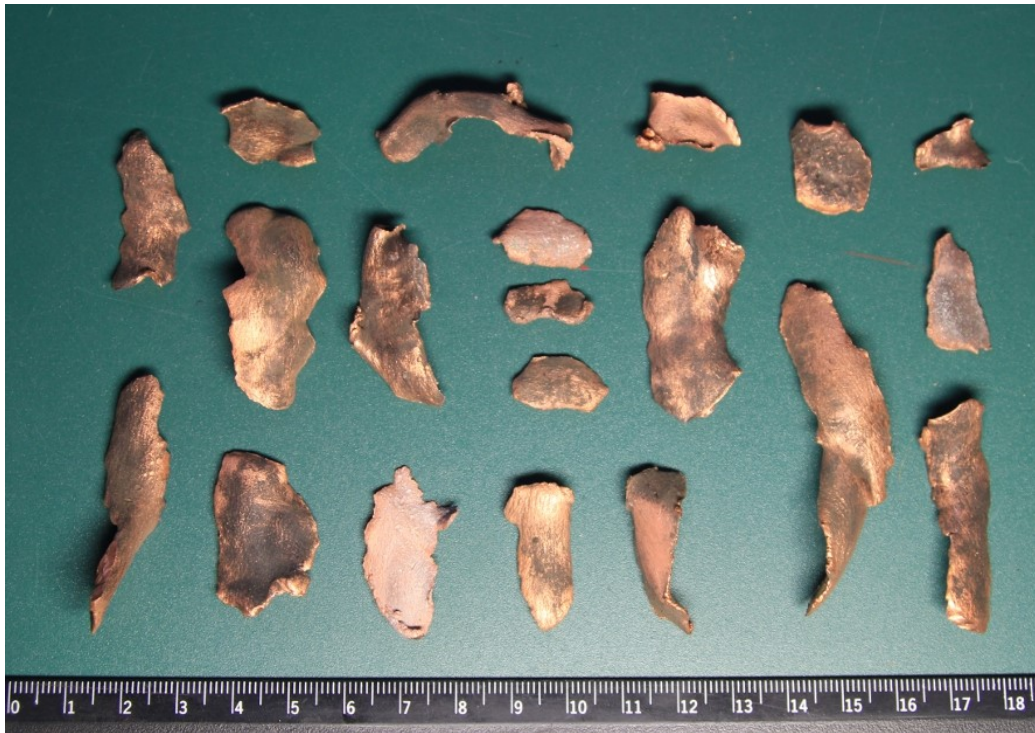


Abbildung 3.2.10: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem ANFO-Sprengstoff "Andex".

Die Abbildung 3.2.11 und Abbildung 3.2.12 zeigen Beispiele von Splitter des in der BAM hergestellten Emulsionssprengstoffes "Emu" bei unterschiedlicher Sprengstoffdichte. Die Dichte des Sprengstoffes in Abbildung 3.2.11 lag bei $1,02 \text{ g/cm}^3$, in Abbildung 3.2.12 bei $1,13 \text{ g/cm}^3$. Die Splitter des Sprengstoffes mit geringerer Dichte waren i.d.R. 2 - 4 mm breiter als die des Sprengstoffes mit höherer Dichte. Eine deutliche Abhängigkeit der Splittergröße von der Dichte des Emulsionssprengstoffes konnte bei den verschiedenen Versuchen jedoch nicht festgestellt werden.



Abbildung 3.2.11: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem Emulsionssprengstoff "Emu" mit einer Dichte von 1,02 g/cm³.



Abbildung 3.2.12: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem Emulsionssprengstoff "Emu" mit einer Dichte von 1,13 g/cm³.

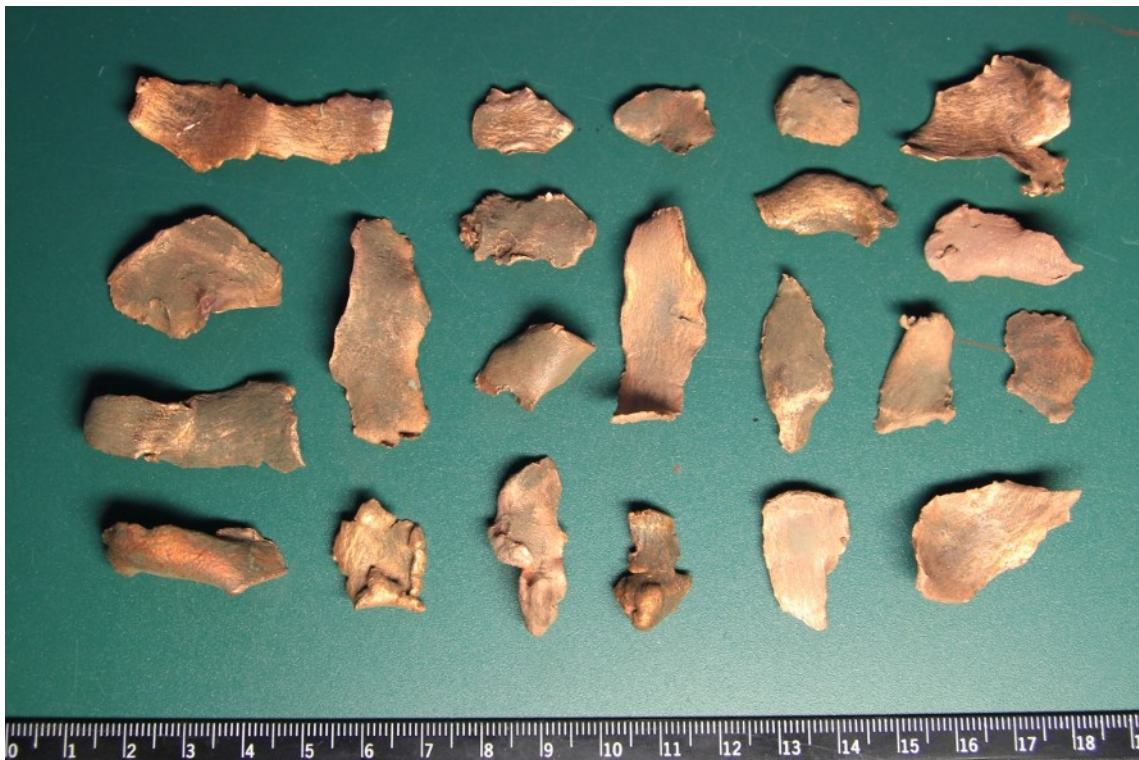


Abbildung 3.2.13: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem Emulsionssprengstoff "Dumbo".



Abbildung 3.2.14: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit dem Emulsionssprengstoff "Emulgite 42G".

In Abbildung 3.2.13 ist das Splitterbild des Emulsionssprengstoffes "Dumbo" dargestellt, und Abbildung 3.2.14 zeigt übliche Splitter des "Emulgit 42G".

Anhand der hier vermessenen Splitter von Emulsionssprengstoffen ließ sich feststellen, dass mit höherer Detonationsgeschwindigkeit die Splittergröße tendenziell abnimmt.

TNT zeigte in Größe, Stärke und Form der Splitter ein ähnliches Bild wie die Emulsionssprengstoffe. Die längeren Splitter waren nicht ganz so häufig, wie dies bei den Emulsionen der Fall war. Die durchschnittlichen Seitenverhältnisse lagen bei ungefähr 1 : 1 bis 1 : 3 bei einer mittleren Länge von 20 bis 40 mm. Auch hier waren vereinzelte Splitter länger. Die Dicke der Splitter lag wieder bei 2,0 bis 2,4 mm. Die Kanten waren häufiger stumpf und wirkten umgebördelt, einige Splitter waren auch scharfkantig und dünn auslaufend. Abbildung 3.2.15 zeigt für das verwendete TNT typische Splitterbild.



Abbildung 3.2.15: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit TNT.

Sehr deutliche Unterschiede im Splitterbild waren bei dem gelatinösen Sprengstoff "Supergel 30" zu sehen. Abbildung 3.2.16 zeigt charakteristische Splitter dieses Sprengstoffes. Die Splitter waren hier im Vergleich zum ANFO oder den Emulsionssprengstoffen klein und hatten ein typisches Längenverhältnis von 1 : 1 bis 1 : 2. Üblicherweise lag die Länge bei 10 bis 25 mm. Splitter mit einer Länge von mehr als 30 mm waren selten. Auch die Stärke der Splitter lag mit 1,8 bis 2,3 mm unter der der anderen Sprengstoffe. Die Kanten waren überwiegend abgerundet und stumpf.

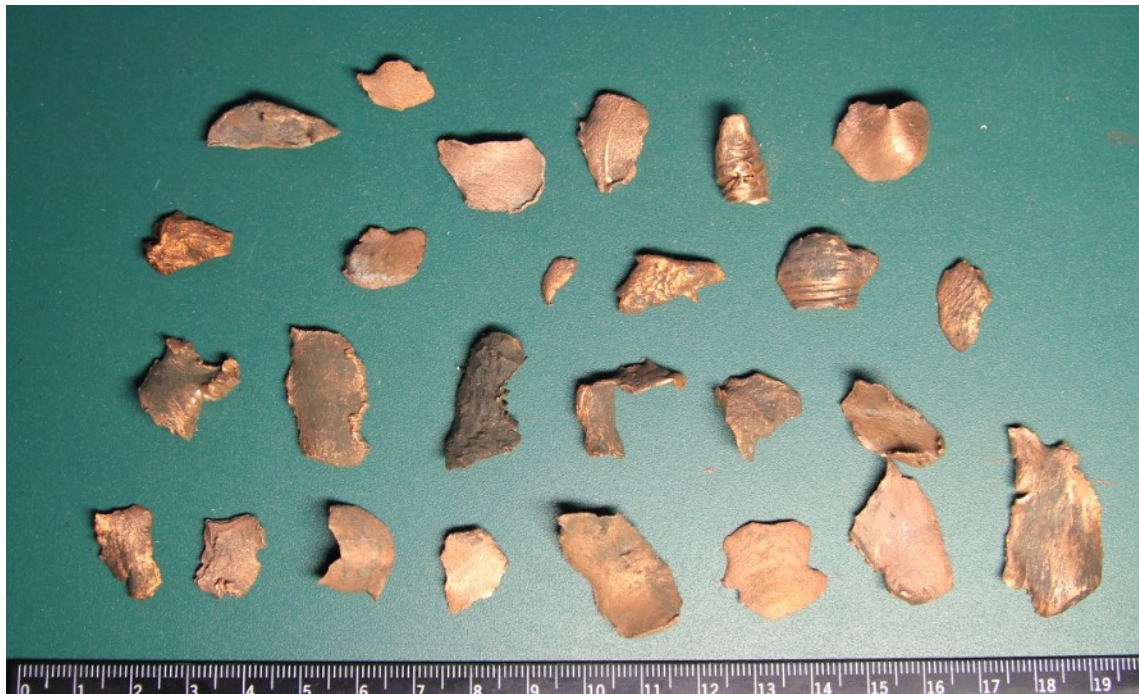


Abbildung 3.2.16: Charakteristische Splitter eines Zylindertests mit einem gelatinösen Sprengstoffes.

Die auffälligsten Splitter bildete jedoch der Wettersprengstoff "Wetter-Westfalit C". Diese Splitter waren mit 40 bis 150 mm sehr lang. Auch hier gab es vereinzelte Splitter, die länger waren. Splitter mit einer Länge von unter 30 mm waren die Ausnahme. Das durchschnittliche Seitenverhältnis lag zwischen 1 : 3 bis 1 : 7. Die Kanten waren glatt und scharfkantig. Die ungefähre Stärke der Splitter lag bei 1,8 bis 2,2 mm. In Abbildung 3.2.17 sind die typischen Splitter des untersuchten Wettersprengstoffs zu sehen.



Abbildung 3.2.17: Charakteristische Splitter eines Wettersprengstoffes.

Eine weitere phänomenologische Beobachtung ist die Struktur der Splitteroberfläche. Die ehemalige Rohraußenseite ist bei fast allen Splintern relativ glatt. Es sind lediglich mehr oder weniger starke Dehnungsstrukturen zu erkennen. Die frühere Rohrinneenseite weist dagegen sprengstoffabhängige Unterschiede auf.

So waren bei dem kompakt verteilten Wettersprengstoff und gelatinösen Sprengstoff ebenfalls die Dehnungsstrukturen zu erkennen, wie sie auf der Außenseite auftraten. Die "Dehnungsfugen" waren beim Wettersprengstoff deutlich länger und ausgeprägter als bei dem gelatinösen Sprengstoff. Je nach Länge des Splitters und Tiefe der Fuge variierten sie beim Wettersprengstoff von 2 - 3 mm bis zu 3 - 4 cm. Bei dem gelatinösen Sprengstoff hatten die "Dehnungsfugen" selten eine Länge von mehr als einem Zentimeter.

Die Splitter der Emulsionssprengstoffe sowie der ANFO-Sprengstoff wiesen leichte "Riffelungen" auf, haben aber zum Teil auch die oben beschriebenen Dehnungsstrukturen. Beide Sprengstoffarten waren gleichmäßig im Rohr verteilt, jedoch mit den sprengstoffbedingten Lufteinschlüssen (Hohlräume beim ANFO, Gasblasen beim Emulsionssprengstoff) auf.

Nahezu kraterförmig war dagegen die Oberflächenstruktur bei dem geschuppten TNT.

Anhand dieser Beobachtungen ließ sich feststellen, dass die makroskopische Struktur des Sprengstoffes Einfluss auf die spätere Oberflächenstruktur der Kupfersplitter hatte.

Die Abbildung 3.2.18 und Abbildung 3.2.19 zeigen Detailaufnahmen der Oberflächen der ehemaligen Rohrinneenseite des Wettersprengstoffes und des TNT im Vergleich.



Abbildung 3.2.18: Detailaufnahme eines Splitters vom Zylindertest mit einem Wettersprengstoff.



Abbildung 3.2.19: Detailaufnahme eines Splitters vom Zylindertest mit TNT.

Die Splitterstärke erlaubt Rückschlüsse auf die maximale Expansion des Kupferzylinders. Bei gleichbleibender Kupferdichte entspricht eine Splitterstärke von 1,8 mm einem Volumenverhältnis V vom maximalen Volumen V_{max} zum Ausgangsvolumen V_0 von ungefähr 10. Bei einer Splitterstärke von 2,4 mm ist das Volumenverhältnis nur noch ungefähr halb so groß. Die Splitter der meisten hier untersuchten Sprengstoffe hatten eine Stärke von 2,0 bis 2,4 mm. Nur der sehr schnell detonierende gelatinöse Sprengstoff "Supergel 30" sowie der langsam detonierende Wettersprengstoff "Wetter-Westfalit C" bildeten zum Teil dünnere Splitter aus.

Tabelle 3.2: Überblick über die durchschnittliche Splittergrößen bei den Zylinderexpansionsversuchen sowie die ermittelten Detonationsgeschwindigkeiten und GURNEY-Energien

Sprengstoff	Länge [mm]	Seiten- verhältnis	Stärke [mm]	Det.- geschw. [km/s]	GURNEY- Energie [MJ/kg]
"Wetter- Westfalit C"	40 - 150	1 : 3 - 1 : 7	1,8 - 2,2	2,34	0,63
"Andex"	15 - 25 30 - 50	1 : 2 1 : 3 - 1 : 5	2,0 - 2,4	3,98	1,66
"Emu" / "Dumbo"	15 - 40	1 : 1,5 - 1 : 3	2,0 - 2,4	3,6 - 5,8	1,39 - 2,93
"Emulgut 42G"	15 - 40	1 : 1,5 - 1 : 3	2,0 - 2,4	4,18	-
"TNT, geschuppt"	20 - 40	1 : 1 - 1 : 3	2,0 - 2,4	4,94	2,24
"Supergel 30"	10 - 25	1 : 1 - 1 : 2	1,8 - 2,3	5,74	2,30

Die Ausmessung der Splitter hat ergeben, dass die Splittergröße mit steigender Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes tendenziell abnahm. Auch das Arbeitsvermögen des jeweiligen Sprengstoffes korrelierte mit der Größe der entsprechenden Splitter. Je höher die GURNEY-Energie des Sprengstoffes war, desto kleiner war die durchschnittliche Splittergröße bei den Zylinderexpansionstests. Tabelle 3.2 fasst die durchschnittlichen Splittergrößen sowie die ermittelten Detonationsgeschwindigkeiten und GURNEY-Energien der jeweiligen Sprengstoffe zusammen.

Diese Abhängigkeit der Splittergröße von der GURNEY-Energie des jeweiligen Sprengstoffes - und somit auch von der Geschwindigkeit der Kupferhülle - lässt vermuten, dass es auch bei den hier durchgeführten Zylindertests die von MOTT (1943, 1947) und GRADY (2006) gefundenen Zusammenhänge zwischen der Anzahl der Risse sowie dem Abstand der Risse zueinander und der Geschwindigkeit der Metallummantelung zum Zeitpunkt der Fragmentierung.

Die theoretische Anzahl der Risse N_f lässt sich durch

$$N_f = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{\rho_M \cdot r_{i,0}}{24 \cdot e_f} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot v_0^{\frac{2}{3}} \quad (3.2.1)$$

abschätzen. Dabei bedeuten ρ_M die Dichte der Metallhülle, $r_{i,0}$ der innere Radius der ursprünglichen Metallhülle, e_f eine auf die Reißfläche bezogene Energie und v_0 ist die Anfangsgeschwindigkeit der Fragmente, also die Endgeschwindigkeit der intakten Metallhülle.

Der Abstand der Risse a_i lässt sich durch

$$a_i = \left(\frac{24 \cdot e_f \cdot r_{max}^2}{\rho_M \cdot v_0^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2.2)$$

abschätzen. r_{max} ist hierbei der innere Radius der Metallummantelung zum Zeitpunkt der Fragmentierung. (MOTT 1943, 1947, GRADY 2006)

Die Überprüfung dieser Vermutung muss Bestandteil späterer Forschungen sein.

4. Auswertung

4.1. GURNEY-Energie und GURNEY-Geschwindigkeit

4.1.1. Bestimmung der radialen Geschwindigkeiten der Zylinderwand

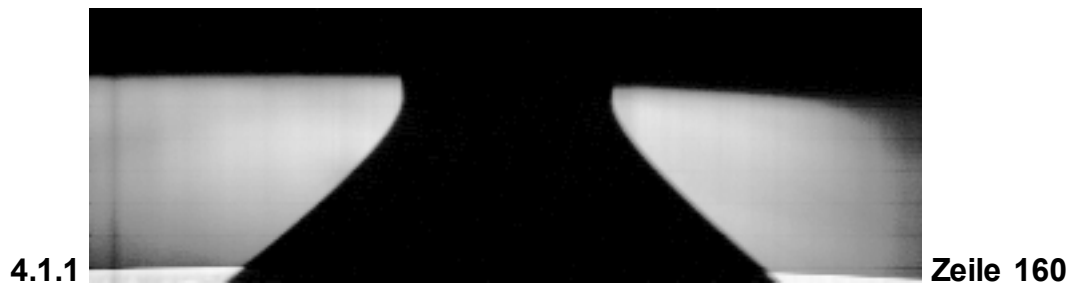
Jede Filmaufnahme der Zylinderrohrtests besteht aus ca. 100 Einzelbildern mit einem zeitlichen Abstand von je 1 μ s. Diese Einzelbilder wurden zunächst aus den Filmaufnahmen extrahiert.

Nun konnte mit Hilfe eines einfachen, selbstverfassten, unter Linux laufenden Skriptes aus diesen 100 Einzelbildern jeweils die gleiche Zeile ausgeschnitten und chronologisch zu einem neuen Bild zusammengefügt werden. So entstanden Streakansichten der Rohraufweitung (Abbildungen 4.1.1. bis 4.1.3.), die den Aufnahmen mit einer Streakkamera entsprechen.

Da die Detonationsfront von oben nach unten durch das Rohr läuft, ist in der Streakansicht der oberen Zeilen sowohl der radiale als auch der axiale Detonationsverlauf stärker vorangeschritten als in Streakansichten von weiter unten gelegenen Bildzeilen. Dies ist in den Abbildungen 4.1.1. bis 4.1.3. deutlich zu erkennen.

Die seitliche (radiale) Ausdehnung der Kupferrohrwand wurde Zeile für Zeile ausgehend von der Bildmitte mit einem selbstverfassten C++-Programm bestimmt. Gegebenenfalls wurden die Streakansichten so beschnitten, dass das Kupferrohr ungefähr in der Bildmitte lag. Da die Filmaufnahmen zum Teil recht kontrastarm waren, wurden die Bilder mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogrammes vor der Auswertung bearbeitet. Sofern dies möglich war, wurde die Kontrasterhöhung bei allen Streakansichten eines Filmes gleichmäßig vorgenommen. So konnten Schwankungen durch diesen Eingriff in das Bildmaterial gering gehalten werden.

Aus jedem Film wurden i. d. R. drei Zeilen in einem Abstand von 10 bis 20 Pixel ausgewählt, aus denen jeweils eine Streakansicht generiert wurde. Bei Filmen mit störenden Hintergrundeffekten oder Unregelmäßigkeiten bei der Rohraufweitung wurden der Zeilenabstand und die Zeilenanzahl variiert.



Abbildungen 4.1.1, 4.1.2 und 4.1.3: Generierte Streakansichten aus einer Aufnahme eines Zylindertests von ANFO-Sprengstoff. Die Streakansichten stammen aus einem Film, wurden aber in unterschiedlichen Höhen des Zylinders generiert.

Nach Bestimmung der Rohrmitte wurden in der Regel die beiden Rohrhälften übereinander gelegt und gemittelt. In Ausnahmefällen wurde nur die Ausdehnung einer Rohrhälfte berücksichtigt. Dies geschah, wenn auf Grund schlechter

Filmaufnahmen die zweite Rohrhälfte undeutlich zu erkennen war. Die in diesen Fällen ermittelten Werte wurden nur berücksichtigt, wenn die Abweichungen zu anderen Versuchen des gleichen Sprengstoffes kleiner als 10 % betragen.

Die Änderung des mittleren Radius der sich ausdehnenden Kupferrohrwand Δr_m wurde aus den ermittelten äußeren Radien r_a mit Hilfe der Gleichung

$$\Delta r_m = \sqrt{r_a^2 - \frac{r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2}{2}} - \sqrt{r_{a,0}^2 - \frac{r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2}{2}} \quad (2.4.3)$$

bestimmt.

Aus dem so erhaltenen Radius-Zeit-Verlauf (Abbildung 4.1.4) bzw. dessen erste zeitliche Ableitung (Abbildung 4.1.5) konnte die Geschwindigkeit der Kupferzylinderwand bestimmt werden. Die zweite zeitliche Ableitung stellt den Verlauf der Beschleunigung der Kupferrohrwand dar (Abbildung 4.1.6).

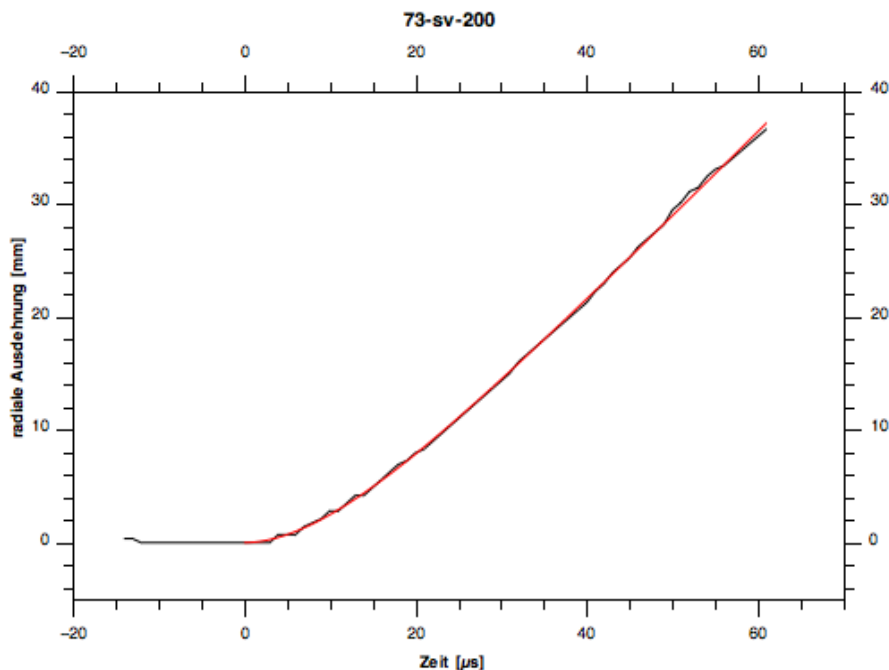


Abbildung 4.1.4: Zeitlicher Verlauf der radialen Ausdehnung der Kupferwand während eines Zylindertests von "Andex".

Die Abbildungen 4.1.4 bis 4.1.6 zeigen exemplarisch die radiale Ausdehnung, Geschwindigkeit und Beschleunigung der in Abbildung 4.1.2 dargestellten Streakansicht eines Zylindertests des ANFO-Sprengstoffs "Andex".

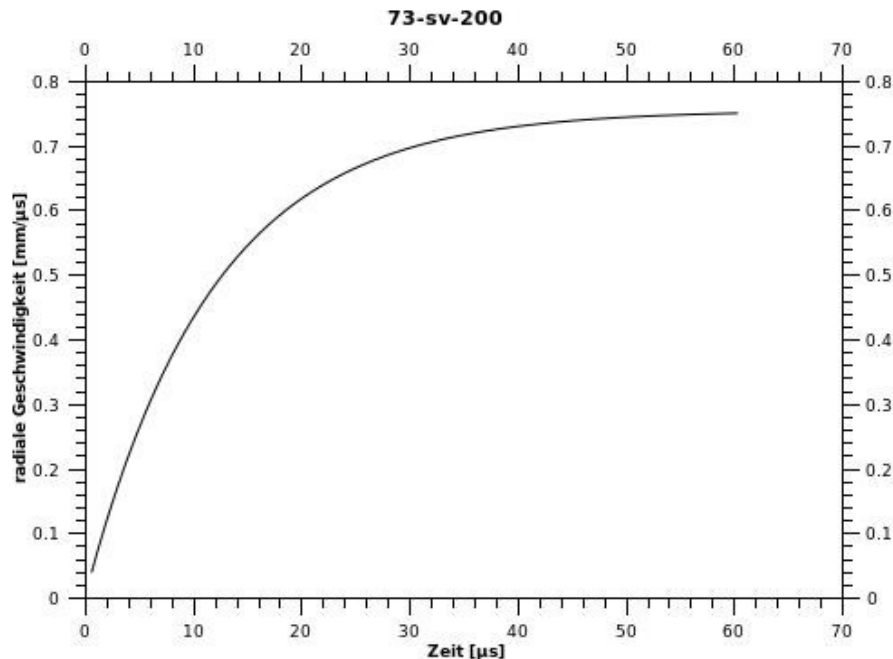


Abbildung 4.1.5: Zeitlicher Verlauf der radialen Geschwindigkeit der Kupferwand während eines Zylindertests von "Andex".

Wie an den Kurven in den Abbildungen 4.1.4 bis 4.1.6 deutlich zu erkennen ist, wurde die Metallhülle durch die Detonationswirkung zunächst deutlich beschleunigt und ging dann in eine gleichförmige Bewegung über. Dieser zunächst exponentiell ansteigende und dann lineare Verlauf der radialen Ausdehnung der Zylinderwand Δr_m lässt sich mit Gleichung 2.4.4 beschreiben (HORNBERG und VOLK 1989):

$$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right) \quad (2.4.4)$$

$$\text{mit } t = t_{\text{exp}} - t_0$$

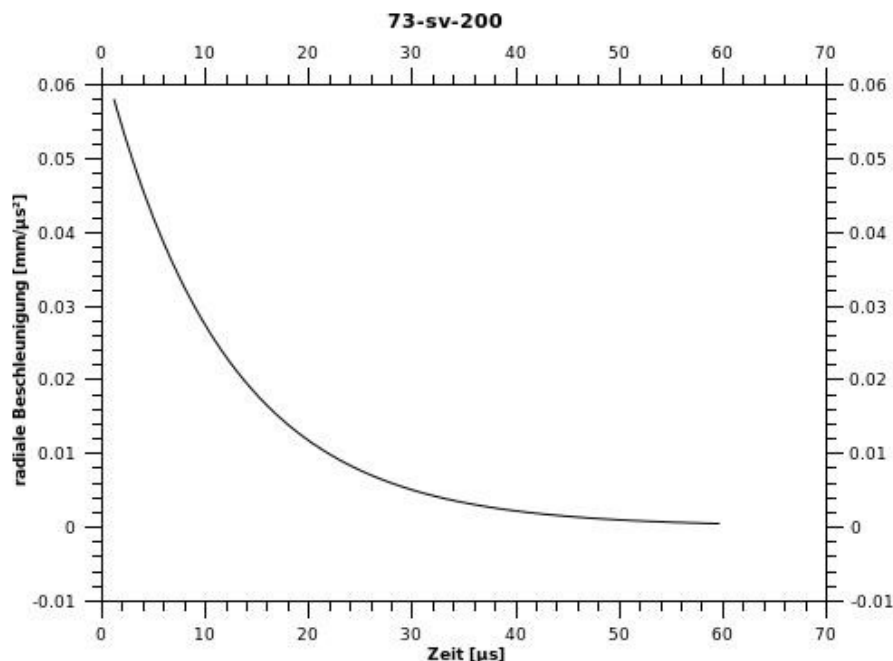


Abbildung 4.1.6: Zeitlicher Verlauf der radialen Beschleunigung der Kupferwand während eines Zylindertests von "Andex".

Durch die Anpassung der experimentell ermittelten Zeit t_{exp} durch die Anfangszeit t_0 werden die Kurven so verschoben, dass sie bei $t = 0 \mu s$ und $\Delta r_m = 0 \text{ mm}$ anfangen.

Die Kurvenanpassungsparameter A_r und B_r wurden durch Regression mit Hilfe der Auswertungssoftware QTILOT® ermittelt.

Die Abbildung 4.1.7 zeigt die mittleren radialen Ausdehnungsverläufe der einzelnen Sprengstoffe. In der Abbildung 4.1.8 sind die mittleren radialen Geschwindigkeiten der Kupferrohrwand dargestellt.

In den Abbildungen ist zu erkennen, dass der mit ca. 2300 m/s recht langsam detonierende Wettersprengstoff auch eine deutlich geringere radiale Endgeschwindigkeit von 0,47 mm/μs hervorbringt als die anderen Sprengstoffe. Der mit einer Detonationsgeschwindigkeit von ca. 6000 m/s recht schnelle gelatinöse Sprengstoff erreicht mit 1,09 mm/μs die höchste radiale Endgeschwindigkeit der untersuchten Sprengstoffe. Der ANFO-Sprengstoff und

das TNT liegen mit einer Radialendgeschwindigkeit von $0,75 \text{ mm}/\mu\text{s}$ bzw. $0,78 \text{ mm}/\mu\text{s}$ dazwischen, genau wie deren Detonationsgeschwindigkeiten von ca. 3900 m/s bzw. 4900 m/s . Die radialen Endgeschwindigkeiten der selbst hergestellten Emulsionssprengstoffe sind breit gefächert. Sie reichen von $0,69 \text{ mm}/\mu\text{s}$ bis $0,95 \text{ mm}/\mu\text{s}$ bei den durch chemische Gasbildung sensibilisierten Emulsionen ("Emu") und $0,91 \text{ mm}/\mu\text{s}$ bis $0,96 \text{ mm}/\mu\text{s}$ bei den mit Mikrohohlkugeln sensibilisierten Emulsionen ("Dumbo").

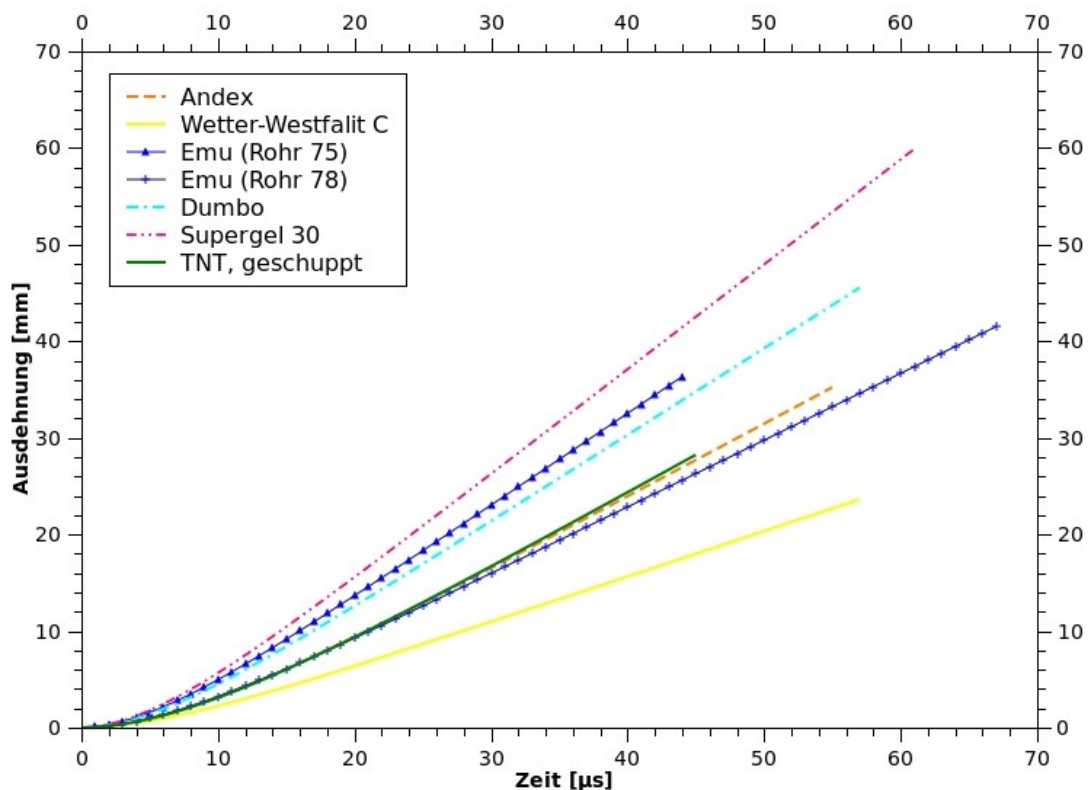


Abbildung 4.1.7: Darstellung der radialen Ausdehnung der Kupferrohrwand als Funktion der Zeit.

Sowohl die durch chemische Gasbildung als auch die mit Mikrohohlkörpern sensibilisierten Emulsionssprengstoffe unterschieden sich stark in der Dichte. Da die Detonationsgeschwindigkeit von Emulsionssprengstoffen stark von deren Dichte abhängt, ist es nachvollziehbar, dass auch die radiale Geschwindigkeit bei der Ausdehnung des Kupferzylinders von der Dichte der jeweiligen

Emulsionssprengstoffe abhängt. Der Übersichtlichkeit halber wurden in den Abbildungen 4.1.7 und 4.1.8 nur zwei gasasste Emulsionen („Emu (Rohr 75)“ und „Emu (Rohr 78)“) mit der niedrigsten und höchsten radialen Endgeschwindigkeit sowie eine mit Mikrohohlkörpern versetzte Emulsion („Dumbo“) mit mittlerer Radialendgeschwindigkeit abgebildet.

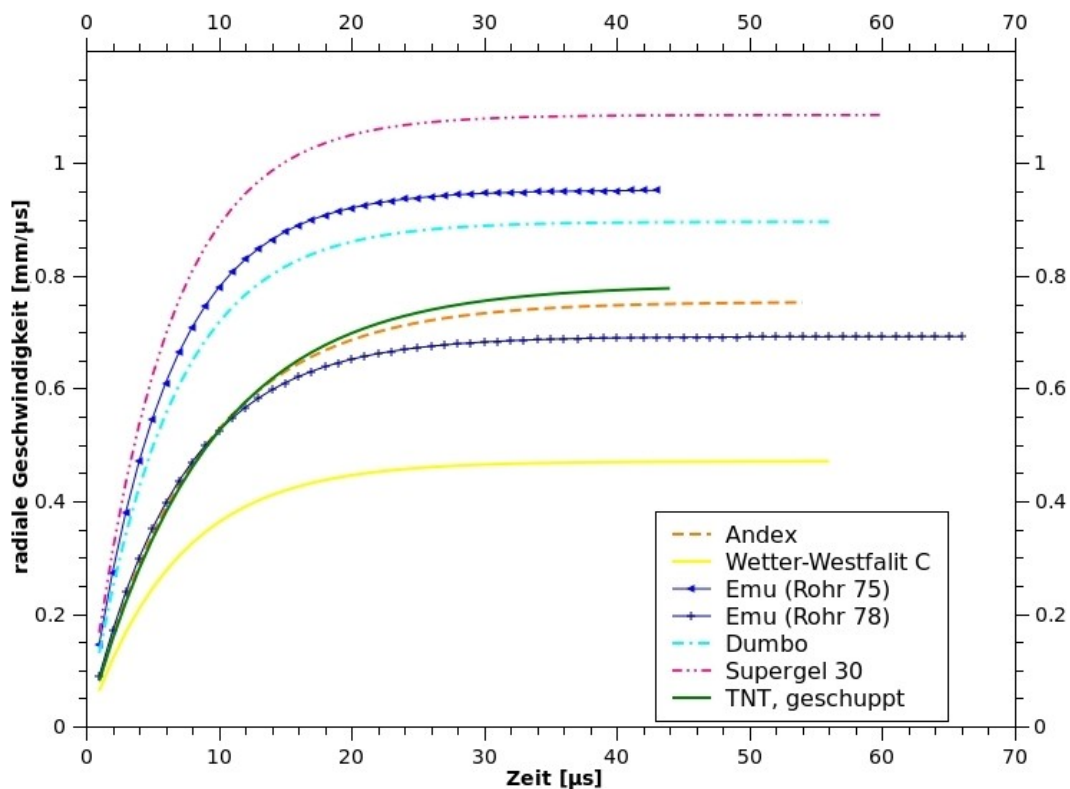


Abbildung 4.1.8: Darstellung der radialen Geschwindigkeiten der Kupferrohrwand in Abhängigkeit der Zeit.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verteilung der Radialgeschwindigkeiten der Zylinderexpansion durchaus der Verteilung Detonationsgeschwindigkeiten entspricht. Abbildung 4.1.9 verdeutlicht, dass tendenziell mit steigender Detonationsgeschwindigkeit die radiale Geschwindigkeit steigt.

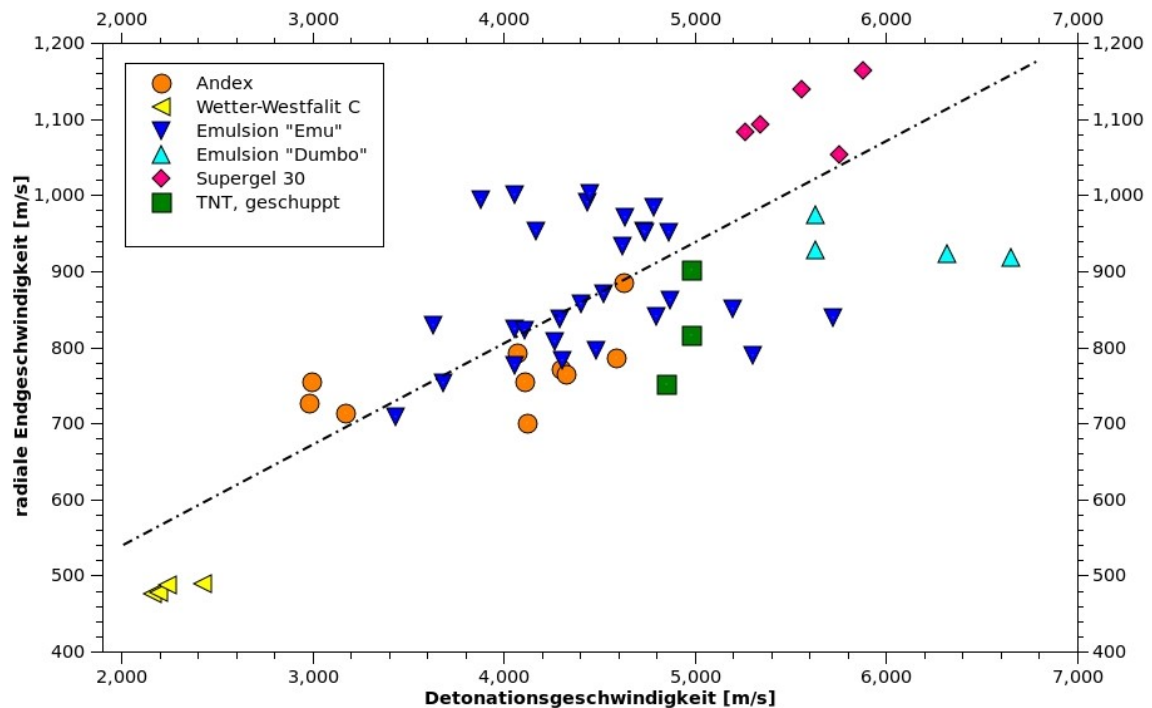


Abbildung 4.1.9: Darstellung der Radialgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Detonationsgeschwindigkeit.

4.1.2. Bestimmung der GURNEY-Energien und GURNEY-Geschwindigkeiten

Zur Berechnung der GURNEY-Energien der verschiedenen Sprengstoffe wurde zunächst die senkrecht zur Mittelachse des Rohres gemessene radiale Geschwindigkeit v_m mittels der Gleichungen 2.4.6 und 2.4.7 korrigiert. Daraus folgt die tatsächliche Ausdehnungsgeschwindigkeit v_L .

Mit dieser kann durch Einsetzen in die GURNEY-Gleichung (2.4.8)

$$e_G = \frac{v_{L,max}^2}{2} \cdot \left(\frac{m_M}{m_C} + \frac{1}{2} \right) \quad (2.4.8)$$

die GURNEY-Energie des jeweiligen Sprengstoffes ermittelt werden.

Mit Kenntnis der GURNEY-Energie e_G lässt sich mit Hilfe der Formel

$$v_G = \sqrt{2 \cdot e_G} \quad (2.2.9)$$

die GURNEY-Geschwindigkeit v_G der jeweiligen Sprengstoffe berechnen.

Die gemittelten maximalen Ausdehnungsgeschwindigkeiten v_L sowie die dazu errechneten GURNEY-Energien e_G sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Ferner sind die Detonationsgeschwindigkeit v_D sowie die ermittelte GURNEY-Geschwindigkeit v_G aufgelistet.

Abbildung 4.1.10 zeigt die Verteilung der GURNEY-Energien der einzelnen Sprengstoffe in Abhängigkeit des Volumenverhältnisses V .

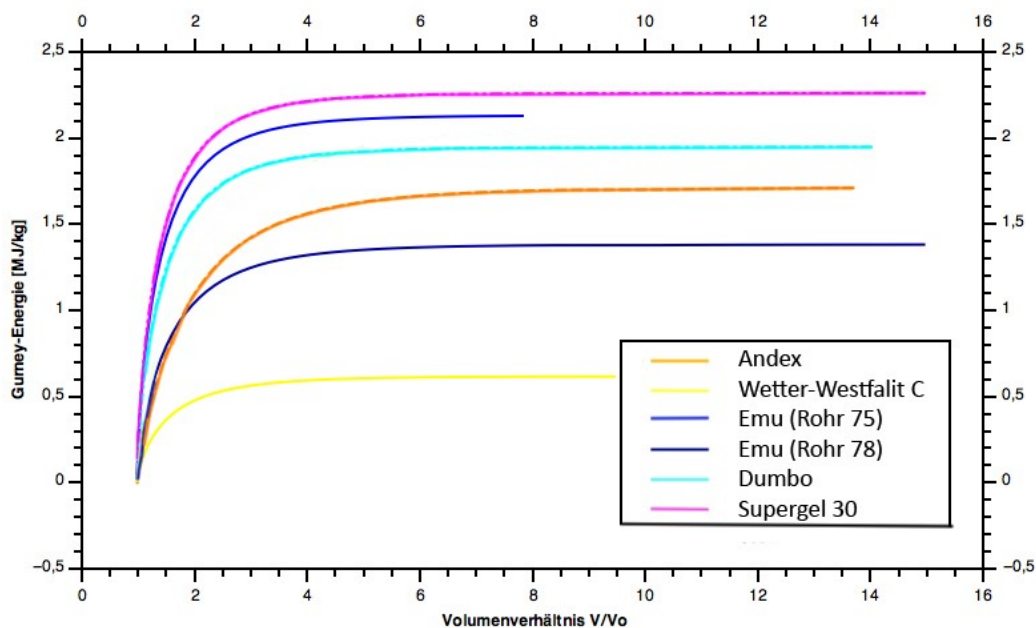


Abbildung 4.1.10: GURNEY-Energien e_G in Abhängigkeit des Volumenverhältnisses V .

Tabelle 4.1: Detonationsgeschwindigkeit, radiale Geschwindigkeit, GURNEY-Energie und -Geschwindigkeit, Verhältnis der Detonations- und GURNEY-Geschwindigkeit der untersuchten Sprengstoffe.

Sprengstoff	Det.- geschw. v_D [km/s] *	radiale Geschw. v_L [mm/ μ s] *	GURNEY- Energie e_G [MJ/kg] *	GURNEY- Geschw. v_G [km/s]	Verhältnis von v_D / v_G
ANFO ("Andex", EURODYN)	3,98 $\pm 0,58$	0,75 $\pm 0,03$	1,66 $\pm 0,15$	1,83	2,17
Wettersprengstoff ("Wetter-Westfalit C", MAXAM DEUTSCHLAND)	2,34 $\pm 0,22$	0,47 $\pm 0,03$	0,63 $\pm 0,04$	1,12	2,09
Emulsion, <i>chemical gassing</i> ("Emu", BAM, nach Angaben von EURODYN)	3,6 bis 5,7	0,69 bis 0,95	1,39 bis 2,93	1,67 bis 2,29	1,69 bis 3,08
Emulsion, Mikrohohlkugeln ("Dumbo", BAM, nach Angaben von EURODYN)	5,6 bis 5,8	0,91 bis 0,96	1,98 bis 2,08	1,99 bis 2,04	2,76 bis 3,31
TNT ("TNT, geschuppt", ELOVITZA)	4,94 \pm 0,06	0,79 $\pm 0,06$	2,24 $\pm 0,28$	2,11	2,34
Gelatinöser Sprengstoff ("Supergel 30", MAXAM DEUTSCHLAND)	5,74 $\pm 0,40$	1,09 $\pm 0,05$	2,30 $\pm 0,18$	2,07	2,77

* Mit Angabe der Standardabweichung

In Tabelle 4.1 sowie in Abbildung 4.1.10 ist die gleiche Verteilung wie bereits bei den radialen Endgeschwindigkeiten in Abbildung 4.1.8 zu sehen. Der Wettersprengstoff hat eine sehr viel geringere GURNEY-Energie als der ANFO-Sprengstoff, TNT, der gelatinöse Sprengstoff und auch die Emulsionen. Für die GURNEY-Geschwindigkeit ist die gleiche Anordnung gegeben. Die GURNEY-Energien und GURNEY-Geschwindigkeiten der Emulsionen sind aufgrund der unterschiedlichen Dichten breit gefächert. Der obere Teil der Abbildung 4.1.11 zeigt, dass tendenziell ein dichteabhängiger Verlauf der GURNEY-Energien bei den Emulsionssprengstoffen gegeben ist, dessen Maximum bei einer Dichte um $1,15 \text{ g/cm}^3$ liegt. Dies zeigt sich auch bei der im unteren Teil der Abbildung 4.1.11 dargestellten Verteilung der Detonationsgeschwindigkeit der verwendeten Emulsionen in Abhängigkeit von der Dichte. Auch dort liegt das Maximum bei einer Dichte von ungefähr $1,15 \text{ g/cm}^3$.

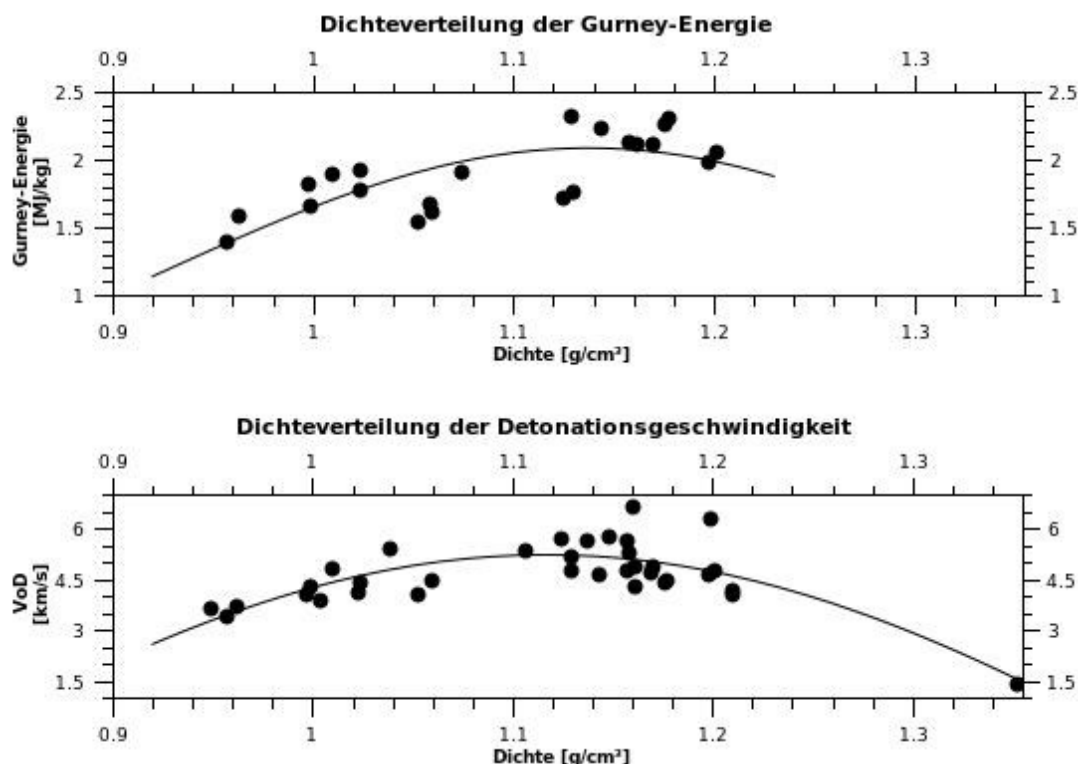


Abbildung 4.1.11: GURNEY-Energien und Detonationsgeschwindigkeiten selbst hergestellter Emulsionssprengstoffe in Abhängigkeit von deren Dichte im Ausgangszustand.

Für das in den Versuchen verwendete TNT wurde eine GURNEY-Energie von 2,24 MJ/kg bestimmt. Diese liegt deutlich unter den in der Literatur angegebenen Werten von 2,9 bis 3,4 MJ/kg. (HORNBERG 1986, CROWLEY 2006 u. a.) Die Ursache liegt in der Form des verwendeten TNT. Während bei den Zylindertests i. d. R. gegossenes TNT zum Einsatz kommen wird, wurde im Rahmen dieser Arbeit mit lose geschüttetem TNT gearbeitet.

Die von OUCHTERLONY, *et al.* (2003, 2005) ermittelten GURNEY-Energien für einen ANFO-Sprengstoff von 1,6 bis 1,9 MJ/kg stimmen hingegen mit dem hier bestimmten Wert von 1,7 MJ/kg gut überein. Auch die Ergebnisse für Emulsionssprengstoffe zeigen mit 1,5 bis 2,3 MJ/kg vergleichbare Werte wie die in dieser Arbeit ermittelten GURNEY-Energien von 1,4 bis 2,9 MJ/kg, obwohl die Zusammensetzung der Sprengstoffe sowie deren Dichte variiert. (OUCHTERLONY, *et al.* 2003, 2005)

Wie in Tabelle 4.2 zu sehen ist, liegt das Verhältnis der Detonationsgeschwindigkeit zur GURNEY-Geschwindigkeit in den meisten Fällen deutlich unter 3. Der für viele militärisch verwendete Sprengstoffe ermittelte empirische Zusammenhang von

$$v_G \approx \frac{v_D}{3} \quad (2.3.12)$$

ist demnach für die hier untersuchten, zivil genutzten Sprengstoffe nicht anwendbar.

Allerdings konnte eine detonationsgeschwindigkeitsabhängige Tendenz festgestellt werden. Abbildung 4.1.12 zeigt das Verhältnis der Geschwindigkeiten v_D / v_G in Abhängigkeit der Detonationsgeschwindigkeit.

Tabelle 4.2: Detonationsgeschwindigkeit, GURNEY-Geschwindigkeit und deren Verhältnis von den untersuchten Sprengstoffen.

Sprengstoff	Det.- geschw. v_D [km/s]	GURNEY- geschw. v_G [km/s]	Verhältnis von v_D / v_G
ANFO	3,98	1,83	2,17
Wettersprengstoff	2,34	1,12	2,09
Emulsion, <i>chemical gassing</i>	3,6 bis 5,7	1,67 bis 2,29	1,69 bis 3,08
Emulsion, Mikrohohlkugeln	5,6 bis 5,8	1,99 bis 2,04	2,76 bis 3,31
TNT	4,94	2,11	2,34
Gelatinöser Sprengstoff	5,74	2,07	2,77

Abbildung 4.1.12 zeigt, dass bei Detonationsgeschwindigkeiten von unter 4000 m/s das Verhältnis von Detonationsgeschwindigkeit zur GURNEY-Geschwindigkeit bei ungefähr 2 liegt. Werte des Geschwindigkeitsverhältnisses von zwischen 2 und 2,5 finden sich dagegen überwiegend bei Detonationsgeschwindigkeiten von 4000 bis 5000 m/s. Erst bei Detonationsgeschwindigkeiten von über 5000 m/s kann ein Geschwindigkeitsverhältnis von ungefähr 2,5 bis 3 gefunden werden.

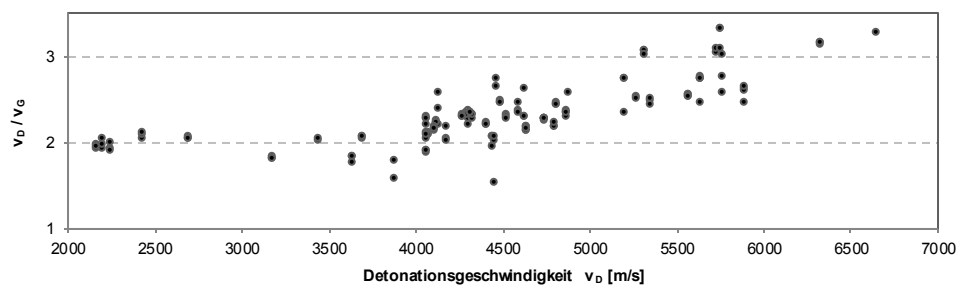


Abbildung 4.1.12: Verhältnis von Detonationsgeschwindigkeit zur GURNEY-Energie in Abhängigkeit der Detonationsgeschwindigkeit

4.1.3. Vergleich der bildgebenden Aufnahmetechnik mit klassischer Streaktechnik

In Zusammenarbeit mit der Firma MBDA-TDW GESELLSCHAFT FÜR VERTEIDIGUNGSTECHNISCHE WIRKSYSTEME MBH konnte die hier verwendete Aufnahme- und Auswertungsmethode mit einer klassischen, bewährten Methode mit Hilfe einer Drehspiegel-Streakkamera verglichen werden. Der Testsprengstoff wurde unabhängig voneinander mit beiden Aufnahmemethoden aufgezeichnet. Die Ergebnisse der radialen Expansionsgeschwindigkeit, der GURNEY-Energie und der GURNEY-Geschwindigkeit sind in Tabelle 4.3 gegenübergestellt.

Die Ergebnisse in Tabelle 4.3 zeigen ähnliche Werte für beide Aufnahmemethoden. Bei der Aufzeichnung mit der Ultra-Highspeedkamera ist die radiale Expansionsgeschwindigkeit etwa 10 % niedriger als bei den Aufnahmen mit einer Drehspiegel-Streakkamera. Die Werte für die GURNEY-Energie und GURNEY-Geschwindigkeit sind demzufolge bei der Streakmethode höher als bei dem bildgebenden Verfahren. Um die Ursache für diesen Unterschied zu klären, sind weitere Versuche mit detaillierter Betrachtung der Fehlertoleranz beider Methoden nötig. Dennoch kann von einer ausreichenden Übereinstimmung der Ergebnisse gesprochen werden. (ARNOLD *et al.* 2011)

Tabelle 4.3: Vergleich der radialen Expansionsgeschwindigkeit, der GURNEY-Energie und der GURNEY-Geschwindigkeit eines Testsprengstoffes der Firma MBDA-TDW, aufgenommen mit einer Ultra-Highspeedkamera und einer Drehspiegel-Streackkamera.

Aufnahmegerät	Expansions- geschw. v_L [mm/ μ s]	GURNEY-Energie e_G [MJ/kg]	GURNEY-Geschw. v_G [km/s]
Ultra-Highspeed- kamera	0,973	1,30	1,607
Drehspiegel- Streackkamera	1,082	1,60	1,788

4.1.4. Einzelbildauswertung

Ein Vorteil des bildgebenden Verfahrens gegenüber der sonst üblichen Streacktechniken ist die Möglichkeit der Einzelbildauswertung.

Betrachtet man nicht den ganzen Film, sondern nur ein einzelnes Bild, so sollte - bei Kenntnis der Detonationsgeschwindigkeit - ebenfalls eine Auswertung möglich sein. Die radiale Ausdehnung wird in diesem Fall nicht auf einer bestimmten Höhe des Rohres, sondern über einen mehrere Zentimeter umfassenden Abschnitt bestimmt. Die zeitliche Achse wird durch die Detonationsgeschwindigkeit festgelegt, liegt aber entgegengesetzt der Detonationsrichtung.

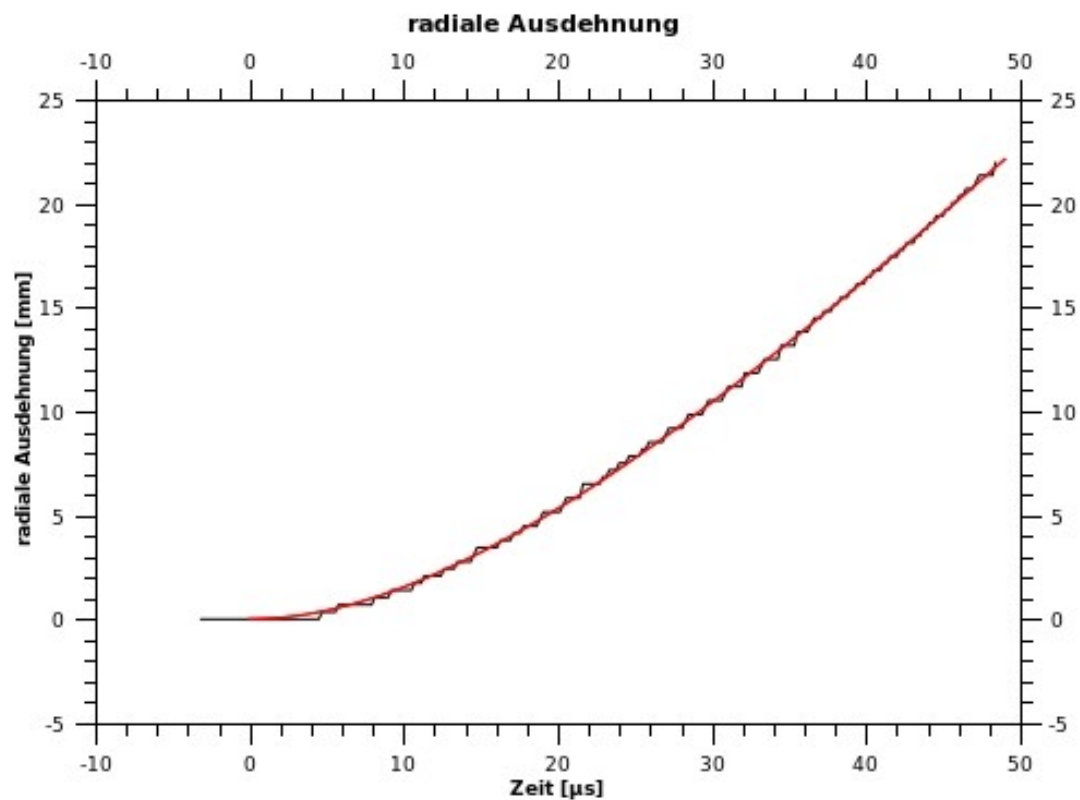


Abbildung 4.1.13: Einzelbildaufnahme eines Zylindertests mit ANFO-Sprengstoff, Bild um 180° gedreht.

Abbildung 4.1.13 zeigt eine Einzelbildaufnahme aus der Aufnahme eines Zylinderexpansionstests eines ANFO-Sprengstoffes. Die Aufnahme wurde um 180 ° gedreht, um die Ähnlichkeit mit den generierten Streakaufnahmen zu verdeutlichen.

Die Bestimmung der radialen Ausdehnung erfolgte ebenfalls mit dem selbstverfassten C+-Programm. Auch die weitere Auswertung und Berechnung erfolgte analog der Streakauswertung.

Wie in Abbildung 4.1.14 zu erkennen ist, folgt auch hier die radiale Ausdehnung der Gleichung 2.4.4 mit einem exponentiellen und einem linearen Anteil.



**Abbildung 4.1.14: Radiale Ausdehnung als Funktion der Zeit
(Einzelbildauswertung eines ANFO-Sprengstoffes).**

In Tabelle 4.4 sind die aus den Einzelbildaufnahmen ermittelten GURNEY-Energien aufgelistet.

Tabelle 4.4: Gegenüberstellung der GURNEY-Energien aus der Einzelbild- und der Streakauswertung. (*Bestimmung der Zeitachse mittels Detonationsgeschwindigkeit des jeweiligen Rohres.)

Sprengstoff	GURNEY-Energie	
	e_G [MJ/kg] Einzelbild	e_G [MJ/kg] Streakansicht
ANFO ("Andex", EURODYN)	1,49 *	1,66
Emulsion, <i>chemical gasing</i> ("Emu", BAM, nach Angaben von EURODYN)	1,42 bis 2,93 *	1,39 bis 2,93
Gelatinöser Sprengstoff ("Supergel 30", MAXAM DEUTSCHLAND)	2,36 *	2,30

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Einzelbildauswertung möglich ist. Allerdings weichen die Ergebnisse gegenüber der Streakansichtsauswertung zum Teil stark ab. Dies zeigt die Gegenüberstellung der radialen Geschwindigkeiten zwischen den beiden Analyseverfahren in Abbildung 4.1.15. Die durchgezogenen Linien stellen die Ergebnisse der Streakauswertung dar, die gestrichelten Linien zeigen die der Einzelbildauswertung.

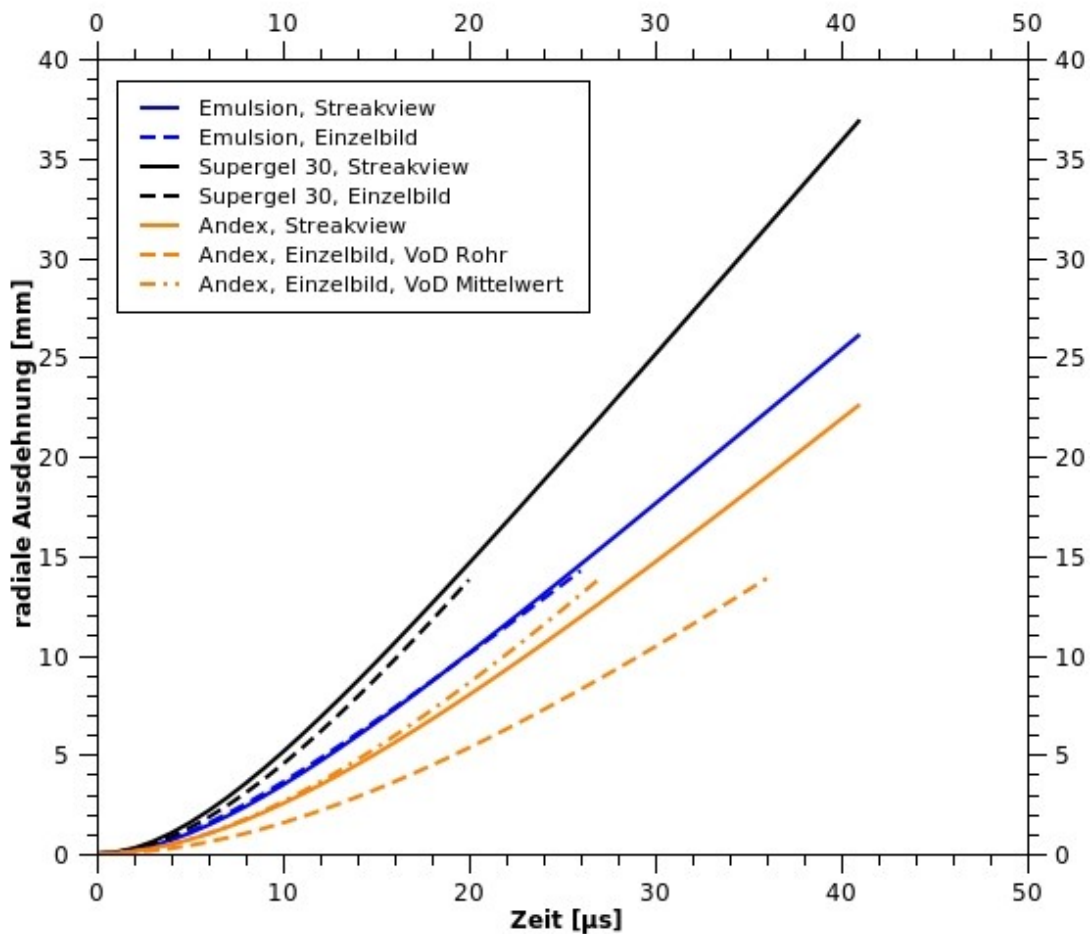


Abbildung 4.1.15: Radiale Geschwindigkeiten von Einzelbild- und Streakauswertung.

Während bei dem untersuchten Emulsionssprengstoff die Streakauswertung und die Einzelauswertung nahezu übereinanderliegen, gibt es bei dem gelatinösen Sprengstoff schon leichte Abweichungen. Noch deutlicher wird die Abweichung bei dem ANFO. Der Grund dafür liegt in der ungenauen Messmethode. Zwei wichtige Faktoren spielen bei der Auswertung eine große Rolle. Zum einen ist die radiale Ausdehnung aus den Filmaufnahmen auf Grund der geringen Auflösung der Filme fehlerbehaftet. Daher wurden auch nur die Filmaufnahmen, die in einer Entfernung von ca. 17 m von der Kamera aufgenommen wurden, bei der Einzelauswertung berücksichtigt. Es sind nur wenige Einzelbilder eines Filmes geeignet, um die radiale Expansionsgeschwindigkeit mit dieser Methode zu bestimmen. Wichtig bei der

Auswahl der Einzelaufnahme ist einen Zeitpunkt der Rohrausdehnung zu finden, der weit genug fortgeschritten ist und trotzdem noch ein Stück des Rohres im Ausgangszustand, d. h. vor Beginn der Expansion zeigt. Des Weiteren dürfen störende Effekte wie eine ungleichmäßige Beleuchtung oder eine beginnende Fragmentierung des Zylinders die Rohrexpansion nicht zu stark verdecken. Als zweiter Faktor spielt die Detonationsgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle bei der Einzelbildauswertung. Zur Bestimmung wurden die in dem jeweiligen Rohr gemessenen Detonationsgeschwindigkeiten herangezogen. Dort kommt es bei dem oben gezeigten ANFO zu einer deutlichen Abweichung der Radialgeschwindigkeit gegenüber der Streakauswertung. Bei Verwendung des Mittelwertes aller im Rahmen dieser Arbeit für ANFO-Sprengstoffe gemessenen Detonationsgeschwindigkeiten wird hingegen eine deutlich bessere Annäherung an die Radialgeschwindigkeit aus der Streakauswertung (Punkt-Strich-Linie) erhalten. Die Messmethode mit der die Detonationsgeschwindigkeiten aufgezeichnet wurden, ist zwar eine recht genaue Methode, die auch erlaubt Einflüsse - wie das Übersteuern des Boosters - zu berücksichtigen. Dennoch zeigt die jahrelange Erfahrung in der BAM, dass auch diese Methode nur eine Genauigkeit von etwa 100 m/s zulässt. Diese Ungenauigkeit hat natürlich direkte Folgen auf die Zeitachse in der Einzelbildauswertung.

Es konnte also gezeigt werden, dass die Möglichkeit einzelne Bilder auszuwerten prinzipiell gegeben ist. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen kann jedoch nicht mehr als eine Größenordnung der Radialgeschwindigkeit und somit auch der GURNEY-Energien wiedergegeben werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde diese Auswertungsmethode deshalb nicht für weitere Untersuchungen herangezogen.

4.1.5. Beurteilung der Messmethode

Der große Vorteil des bildgebenden Verfahrens liegt darin, dass die zu untersuchende Zeile erst im Nachhinein bestimmt wird. So besteht die Möglichkeit die Expansion des Rohres über mehrere Zentimeter zu betrachten und eine geeignete Stelle auszusuchen. Dadurch können Hintergrundeffekte, die

durch ungleichmäßige Beleuchtung entstanden sind, berücksichtigt werden. Schwaden von bereits umgesetztem Sprengstoff, vom Booster oder von der Sprengschnur können bei der Auswahl der auszuwertenden Zeile ebenfalls berücksichtigt werden.

Das bildgebende Verfahren ermöglicht auch Unregelmäßigkeiten in der Ausdehnung des Kupferzylinders, z. B. durch inhomogene Sprengstofffüllung oder Materialschwächen, zu erkennen. Auch das frühzeitige Aufreißen der Metallhülle und die dadurch austretenden Sprengstoffschwaden sind auf den Filmaufnahmen deutlich erkennbar und können bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Die Abbildung 4.1.16 zeigt eine Einzelbildaufnahme aus einem Zylinderrohrtest eines Emulsionssprengstoffes. Die oben erwähnte Schwadenentwicklung der zur Initiierung verwendeten Sprengschnur ist deutlich erkennbar. Ebenso sind die Unregelmäßigkeiten in der Helligkeitsverteilung der Beleuchtung mit einer Argonbombe zu sehen, und die Metallhülle beginnt an zwei Stellen bereits aufzureißen. Trotz dieser optischen Probleme konnte der Film ausgewertet werden.

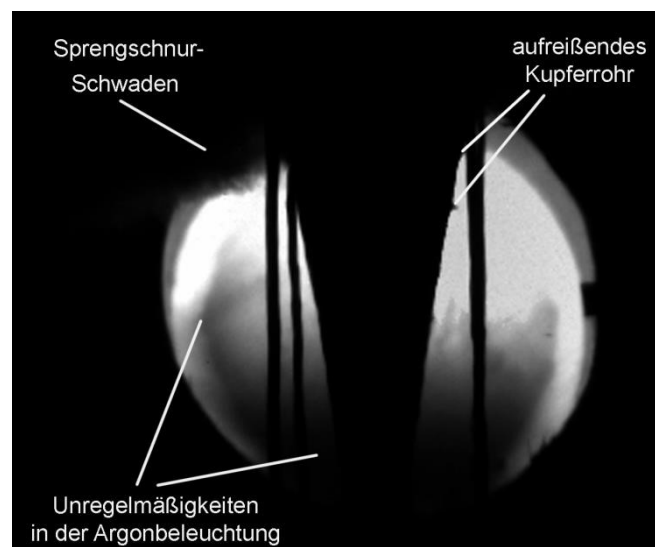


Abbildung 4.1.16: Einzelbild aus einer Zylindertestaufnahme eines Emulsionssprengstoffes. Die schwarzen Linien rechts und links vom aufgeweiteten Rohr sind die Beine der Haltevorrichtung.

Durch die Betrachtung aller Einzelbilder des jeweiligen Filmes ist zu erkennen, bis zu welchem Zeitpunkt die Filmaufnahme noch realistische Ergebnisse liefern kann und ab wann das Aufreißen der Kupferhülle keine verwertbaren Ergebnisse mehr liefert.

Noch deutlicher ist dies in den Einzelbildern in den Abbildungen 4.1.17 bis 4.1.19 zu sehen. Diese Aufnahme eines Zylindertests von mit Mikrohohlkörpern sensibilisiertem Emulsionssprengstoff ("Dumbo") wurde zunächst als nicht auswertbar eingestuft. Dennoch gelang es durch geeignete Wahl der auszuwerteten Zeilen ein Ergebnis zu erzielen, dass sich nur im Rahmen der Messungenauigkeit von denen anderer Zylindertests des gleichen Sprengstoffes unterscheidet.

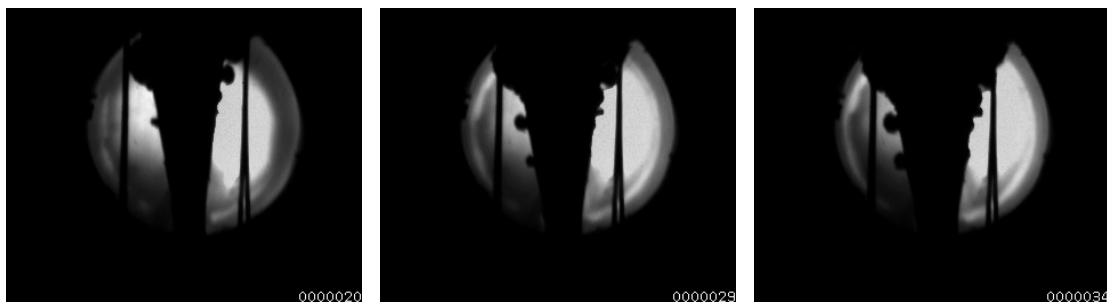


Abbildung 4.1.17, 4.1.18 und 4.1.19: Einzelbilder aus einem Zylindertest des Emulsionssprengstoffs "Dumbo".

Des Weiteren können pro Versuch mehrere Zeilen ausgewertet werden. So ergeben sich Vergleichswerte, die unter denselben Bedingungen aufgezeichnet wurden. Unregelmäßigkeiten, wie sie z. B. durch ungleichmäßige Verteilung des Sprengstoffes im Kupferrohr entstehen, lassen sich so leichter erkennen. Dies war sehr deutlich am Emulsionssprengstoff "Emulgit 42G" zu erkennen. Die Röntgenaufnahme (Abbildung 4.1.20) zeigte deutlich eine inhomogene Verteilung des Sprengstoffes auf Grund zahlreicher eingeschlossener Luftblasen, und auch die Sprengstoffverteilung an den Rohrenden zeigte deutliche Luftpinschlüsse (Abbildung 4.1.21).

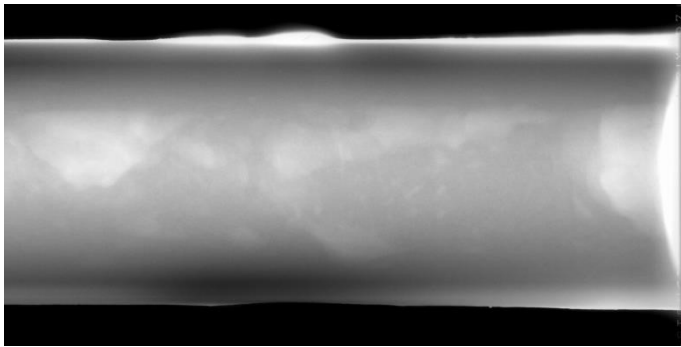


Abbildung 4.1.20: Ausschnitt aus einer Röntgen-Aufnahme eines mit "Emulgit 42G" gefüllten Kupferrohres.



Abbildung 4.1.21: Draufsicht auf das mit "Emulgit 42G" gefüllte Kupferrohr.

Die Auswertung unterschiedlicher Zeilen des gleichen Rohres lieferten hier keine reproduzierbaren Ergebnisse (Abbildung 4.1.22).

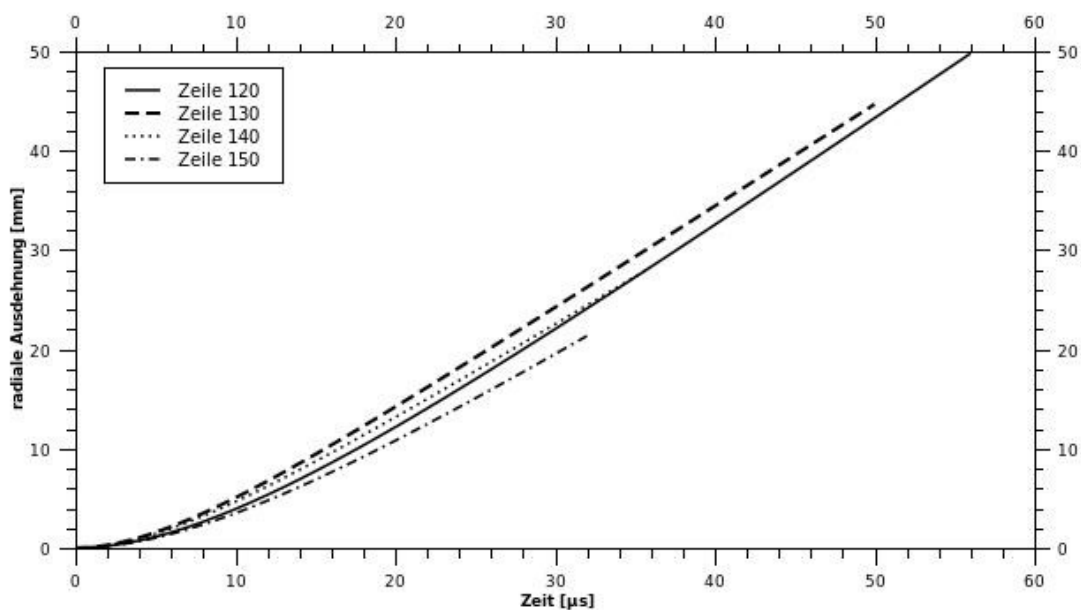


Abbildung 4.1.22: Radiale Ausdehnung der Kupferwand in unterschiedlichen Höhen bei einem Versuch mit "Emulgit 42G".

Dennoch ist anzumerken, dass das Verfahren mit der gegebenen Technik auch seine Grenzen erfährt. Die Kamera liefert zwar mit einer Geschwindigkeit von

1.000.000 Bildern pro Sekunde eine sehr hohe Aufnahmegeschwindigkeit. Die Auflösung der Filmaufnahmen ist mit 312 x 260 Pixeln jedoch recht gering. Speziell bei den Aufnahmen, bei denen die Entfernung zwischen Zylinder und Kamera 50 bis 60 m betrug, ist der Fehler besonders in der Beschleunigungsphase der Kupferwand relativ hoch. Bei den späteren Aufnahmen in einer Entfernung von ca. 17 m zu der Kamera ist eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit zu verzeichnen, d.h. der relative Fehler halbiert sich nahezu. Mit den gegebenen technischen Möglichkeiten können also reproduzierbare Zylindertestergebnisse erhalten und die „Ausschussquote“ der Filmaufnahmen verringert werden.

4.1.5.1. Genauigkeit der verwendeten Messmethode

Bei der Durchführung experimenteller Arbeiten gibt es eine Vielzahl von Faktoren, die die Genauigkeit der Messmethode beeinflussen. Einige Faktoren können aufgrund ihrer geringen Einflussnahme auf das Messergebnis vernachlässigt werden, andere Faktoren können im Nachhinein korrigiert werden. Die übrigen Faktoren müssen zur Betrachtung der Messgenauigkeit herangezogen werden.

Bei der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Methode spielt die räumliche Auflösung der erhaltenen Filmaufnahmen eine entscheidende Rolle bei der Betrachtung der Messgenauigkeit. Durch die technisch bedingte geringe Auflösung der Filmaufnahmen von 312 x 260 Pixel erscheint die seitliche Aufweitung des Kupferzylinders stufenförmig. Um diesen Fehler zu verringern, wurde bei dem Programm zur Ermittlung der radialen Ausdehnung r ein Graustufenwert von 80 % und höher als zum Rohr gehörend betrachtet. Dennoch ist ein Fehler der radialen Ausdehnung Δr von ± 1 Pixel als realistisch anzusehen. Je nach Abstand zwischen Kamera und Kupferzylinder entspricht dies einem Fehler Δr von ca. $\pm 0,5$ mm bis ca. ± 2 mm. In diesem Fehler berücksichtigt sind neben der stufenförmigen Auflösung der Rohraufweitung auch Schwankungen der Beleuchtung sowie geringfügige Neigungen des Rohres um seine Mittelachse. Um diese Neigung zu minimieren wurde bereits beim Aufbau

mit einer Wasserwaage der senkrechte Stand des Rohres kontrolliert und ggf. angeglichen. Bei den ersten Filmaufnahmen wurde mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogrammes das Bild im Nachhinein gedreht. Auch die Kamera wurde mit Hilfe einer Libelle ausgerichtet.

In Anbetracht der Messungenauigkeit der radialen Ausdehnung sind äußere Einflüsse wie Temperatur und Luftdruck sowie eventuelle Schwankungen in der Qualität der Zylinder oder der Sprengstoffe marginal und können deshalb vernachlässigt werden.

Um eine Aussage über die Genauigkeit der radialen Endgeschwindigkeit v_m zu treffen kann mit Hilfe der GAUßschen Fehlerfortpflanzung der Fehler Δv_m durch

$$\Delta v_m = \sqrt{\left(\frac{\partial v_m}{\partial r} \cdot \Delta r\right)^2 + \left(\frac{\partial v_m}{\partial t} \cdot \Delta t\right)^2} \quad (4.1.1)$$

ermittelt werden.

Daraus ergibt sich nach partieller Differenzierung der Ausdruck

$$\Delta v_m = \sqrt{\frac{\Delta r^2 \cdot v_m^2 + \Delta t^2 \cdot v_m^4}{r^2}} \quad (4.1.2)$$

Dabei wird der Fehler umso größer, je größer der Fehler der radialen Ausdehnung Δr wird und je kleiner die gemessene Ausdehnung r ist. Wird für den Fehler der radialen Ausdehnung $\Delta r = 1$ Pixel und für den Zeitfehler $\Delta t = 0,5 \mu s$ angenommen, so liegt der Geschwindigkeitsfehler Δv_m i.d.R. zwischen 3,5 % und 8,5 % bei einer Entfernung von ca. 60 m zwischen Kamera und Rohr. Bei einer Entfernung von ca. 17 m verringert sich der Fehler Δv_m auf durchschnittlich 1,5 % bis 3,5 %. Im Gegensatz zu diesen durch Streakauswertung gewonnenen Daten liegt der Fehler Δv_m bei der Einzelaufnahmeauswertung trotz der geringeren Aufnahmeentfernung bei durchschnittlich 4 % bis 8,5 %. Dies liegt an der zusätzlichen Einflussnahme des Detonationsgeschwindigkeitsfehlers $\Delta v_D = 100$ m/s.

Abbildung 4.1.23 zeigt die relativen Fehler in Abhängigkeit der gemessenen Aufweitung. Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass durch die Verringerung der

Entfernung des Zylinders zur Kamera um über 40 m die Ungenauigkeit der Geschwindigkeitsmessung deutlich abnimmt.

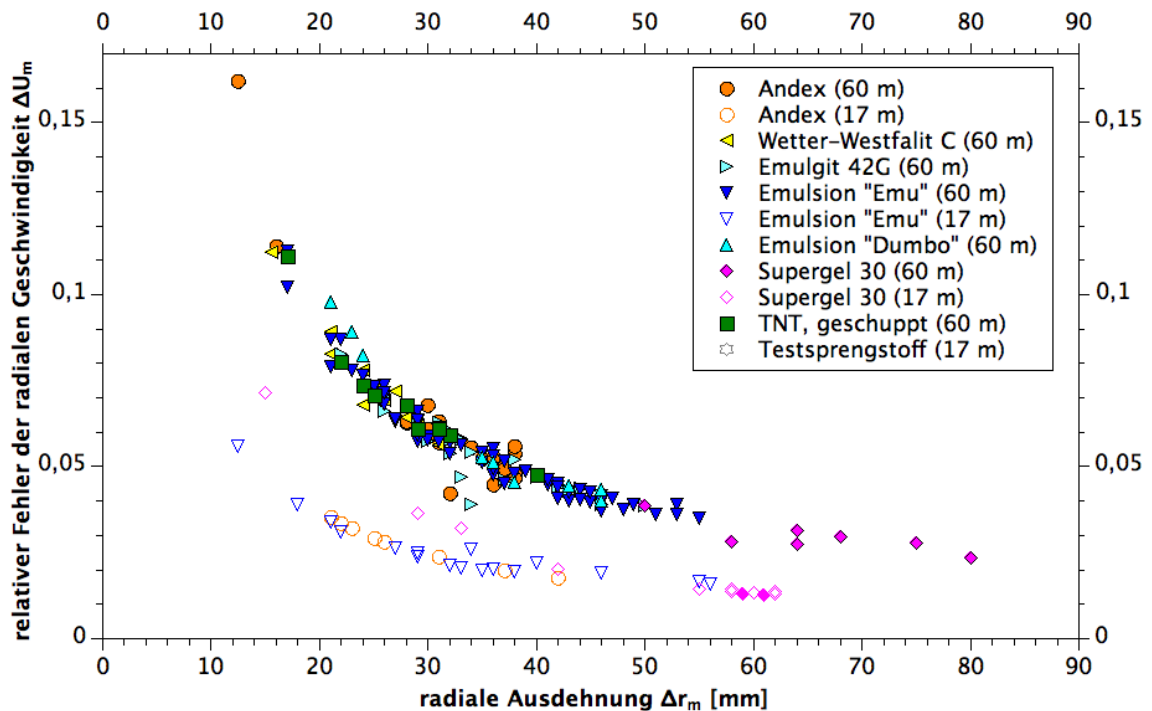


Abbildung 4.1.23: Darstellung des relativen Fehlers der gemessenen radialen Endgeschwindigkeit in Abhängigkeit der ermittelten maximalen radialen Ausdehnung

Betrachtet man die Messgenauigkeit der GURNEY-Energien ebenfalls mit Hilfe der GAUßschen Fehlerfortpflanzung, so ergibt sich:

$$\Delta e_G = \sqrt{\left(\frac{\partial e_G}{\partial v_L} \cdot \Delta v_L\right)^2 + \left(\frac{\partial e_G}{\partial m_M} \cdot \Delta m_M\right)^2 + \left(\frac{\partial e_G}{\partial m_C} \cdot \Delta m_C\right)^2} \quad (4.1.3)$$

$$\text{mit } \Delta m_M = \Delta m_C = \Delta m \text{ und } \Delta v_L = \Delta v_m$$

$$\Delta e_G = \sqrt{v_L^2 \cdot \Delta v_m^2 \cdot \left(\frac{m_M}{m_C} + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{v_L^4 \cdot \Delta m}{4 \cdot m_C^2} \cdot \left(\Delta m + \frac{m_M^2}{m_C^2}\right)} \quad (4.1.4)$$

Unter Berücksichtigung des Waagenfehlers von $\Delta m = 0,005$ kg ergeben sich dann für den Fehler der GURNEY-Energien Δe_G wieder in Abhängigkeit der

gemessenen radialen Ausdehnung Werte von durchschnittlich 5 % bis 14 % bzw. 1,5 % bis 7,5 %, je nach Entfernung zwischen Zylinder und Kamera (Abbildung 4.1.24).

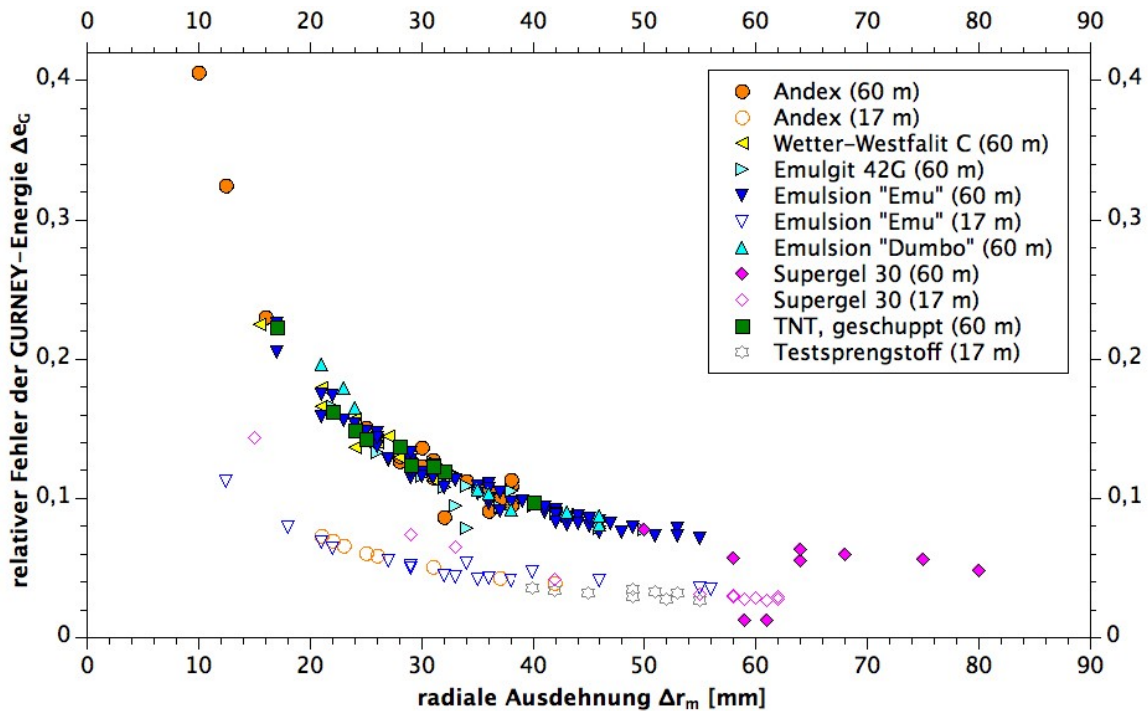


Abbildung 4.1.24 : Darstellung des relativen Fehlers der bestimmten Gurney-Energie in Abhängigkeit der ermittelten maximalen radialen Ausdehnung

Die Differenz zwischen tatsächlicher radialer Endgeschwindigkeit v_L und durch die Streakauswertung ermittelter radialer Endgeschwindigkeit v_m , die durch die Verschiebung um den Winkel $\Theta/2$ entsteht, wurde bereits bei der Ermittlung der GURNEY-Energien korrigiert und kann deshalb bei der Betrachtung der Messgenauigkeit vernachlässigt werden.

4.2. JWL-Parameter

Aus den Ergebnissen der Zylindertests der verschiedenen zivil genutzten Sprengstoffe wurden die Parameter der JONES-WILKINS-LEE-Zustandsgleichung mit einem Fitting-Verfahren ermittelt. Da kein geeigneter Computer-Code zur Berechnung der JWL-Parameter zur Verfügung stand, wurden diese Parameter mit Hilfe eines ingenieurstechnischen Verfahrens - angelehnt an die Beschreibung von MILLER und ALEXANDER (1989) - ermittelt. Dazu war es nötig zunächst die isentropen Druck- und Energie-Kurven in Abhängigkeit vom Volumenverhältnis zu ermitteln.

Das Volumenverhältnis V ist definiert durch

$$V = \frac{v_i}{v_0} = \frac{\rho_0}{\rho_i} = \frac{r_i^2}{r_{i,0}^2} = \frac{r_m^2 - \frac{1}{2} \cdot (r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2)}{r_{i,0}^2} \quad (2.4.30)$$

v_0 ist das Ausgangsvolumen, v_i das Expansionsvolumen, ρ_0 die Dichte des Sprengstoffes, r_i und r_m sind der innere bzw. mittlere Radius des expandierenden Zylinders und $r_{i,0}$ und $r_{a,0}$ der innere bzw. äußere Ausgangsradius.

Mit dieser Beziehung lässt sich die Änderung des Volumenverhältnisses mit steigender radialer Ausdehnung bestimmen.

Die erste zeitliche Ableitung der radialen Ausdehnung ergibt die radiale Geschwindigkeit v_m , die zweite zeitliche Ableitung die radiale Beschleunigung a (vgl. Kapitel 4.1.1.). Diese wurde aus den einzelnen Streakansichten ermittelt. Aufgrund der geringen Auflösung der Filmaufnahmen war die Darstellung der radialen Ausdehnung in den Weg-Zeit-Kurven stufenförmig an. Da aber aufgrund der Detonationsphysik von einer gleichmäßigen und nicht stufenförmig-sprunghaften Ausdehnung ausgegangen werden kann, wurde die erste und zweite zeitliche Ableitung nicht von der eigentlichen Ausdehnungskurve, sondern von deren Ausgleichsfunktion nach

$$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right) \quad (2.4.4)$$

gebildet.

Zur Ermittlung der Druck-Volumen-Kurven wurde von dem einfachen physikalischen Zusammenhang

$$p = \frac{m_M \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot r_i} \quad (2.4.9)$$

mit der spezifischen Masse des Kupferzylinders m_M , der Druck an der Metallummantelung bestimmt. Dazu wurde der innere Radius r_i der Zylinderwand aus den Ergebnissen der Zylindertests aus dem Zusammenhang zwischen der Änderung des mittleren Radius Δr_m und den inneren und äußeren Ausgangsradii $r_{i,0}$ und $r_{a,0}$

$$r_i = \sqrt{\left(\sqrt{r_{a,0}^2 + \frac{1}{2} \cdot (r_{i,0}^2 - r_{a,0}^2)} + \Delta r_m \right)^2 - \frac{1}{2} \cdot (r_{a,0}^2 - r_{i,0}^2)} \quad (2.4.10)$$

ermittelt.

Ausgehend von der Annahme, dass die Detonationsschwaden gleichmäßig verteilt sind und es zu keinem Druckverlauf entlang der radialen Ausdehnung kommt, kann dieser Druck mit dem isentropen Druck gleichgesetzt werden. Es gilt also

$$p = p_s = A \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{V^{\omega+1}}. \quad (2.4.13)$$

Zur Ermittlung der isentropen Energie-Volumen-Kurve wurde zunächst die GURNEY-Energie $e_G(v_m)$ als Funktion der radialen Ausdehnungsgeschwindigkeit v_m berechnet:

$$e_G(v_m) = \frac{v_m^2}{2} \cdot \left(\frac{m_M}{m_C} + \frac{1}{2} \right). \quad (4.2.1)$$

Daraus konnte die spezifische Detonationsenergie e_D berechnet werden:

$$e_D = e_G \cdot \rho_0. \quad (4.2.2)$$

Die innere Energie e_S bei konstanter Entropie ist

$$e_S = e_{S, bei V=1} - e_D, \quad (2.4.21)$$

wobei es für die meisten Sprengstoffe eine gute Annäherung ist, für $e_{S, bei V=1}$ 90% der spezifischen Anfangsenergie e_0 anzunehmen (MILLER und ALEXANDER 1989):

$$e_{S, bei V=1} = 0,9 \cdot e_0 \quad (2.4.22)$$

$$\text{mit } e_0 = q \cdot \rho_0.$$

Die Explosionswärme q wurde für diese Arbeit aus Berechnungen der Sprengstoffzusammensetzung mit Hilfe der ICT-DATENBANK erhalten. Grundlage der ICT-DATENBANK ist die theoretische Berechnung der Explosionswärmen über die Bildungsenergien der einzelnen Sprengstoff- und Schwadenbestandteile (vgl. hierzu Kapitel 2.4.3).

Man erhält die spezifische Energie pro Volumeneinheit entlang der isentropen Zustandsänderung. Dies bedeutet, dass die Energie e_S mit der isentropen Energie-Darstellung der JWL-Gleichung äquivalent ist:

$$e_S = (0,9 \cdot q - e_G) \cdot \rho_0 = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 \cdot V} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{\omega \cdot V^\omega}. \quad (4.2.3)$$

4.2.1. Ermittlung der JWL-Parameter durch "partielltes Fitting"

Die einzelnen Parameter der JWL-Zustandsgleichung wurden nacheinander ermittelt, um ihnen eine gewisse Gewichtung zu geben. Angefangen wurde dabei mit den beiden Parametern C und ω . Diese wurden dann zur Berechnung der Parameter B und R_2 herangezogen. Schließlich wurden unter Kenntnis dieser vier Parameter die letzten beiden Parameter A und R_1 ermittelt. Grundlage dieses Verfahrens ist die Annahme eines idealen Detonationsverhaltens.

Zunächst wurde die spezifische innere Energie bei konstanter Entropie e_s gegen das Volumenverhältnis V aufgetragen. Abbildung 4.2.1 zeigt eine solche Energie-Kurve am Beispiel eines Emulsionssprengstoffes. Bis zu welchem Volumenverhältnis die Expansion der einzelnen Filmaufnahmen reichte, war Abhängig von der Expansionsgeschwindigkeit und von der Länge und Qualität der Filmaufnahmen. Üblicherweise konnte ein Volumenverhältnis von $V \geq 8$ dargestellt werden. Bei einigen Filmaufnahmen war dies jedoch nicht der Fall. Da die Energie-Kurven auf den gefitteten Ausdehnungsfunktionen beruhten, wurde die Geschwindigkeits-Kurve für Volumenverhältnisse von $6 \leq V \leq 8$ extrapoliert. Somit konnte auch die Energie-Kurve bis zu einem Volumenverhältnis von $V \geq 8$ dargestellt werden. Allerdings wurden die so erhaltenen Ergebnisse der JWL-Parameter nur dann berücksichtigt, wenn die Abweichung zu den anderen Ergebnissen des jeweiligen Sprengstoffes nicht größer als 10% war. Die Kurven mit einem maximalen Volumenverhältnis von $V \leq 6$ wurden i. d. R. nicht berücksichtigt. Zum Zweck der Gleichbehandlung wurde für die Parameter-Ermittlung jedoch nur der Bereich bis zu einem Volumenverhältnis von $V = 8$ bewertet.

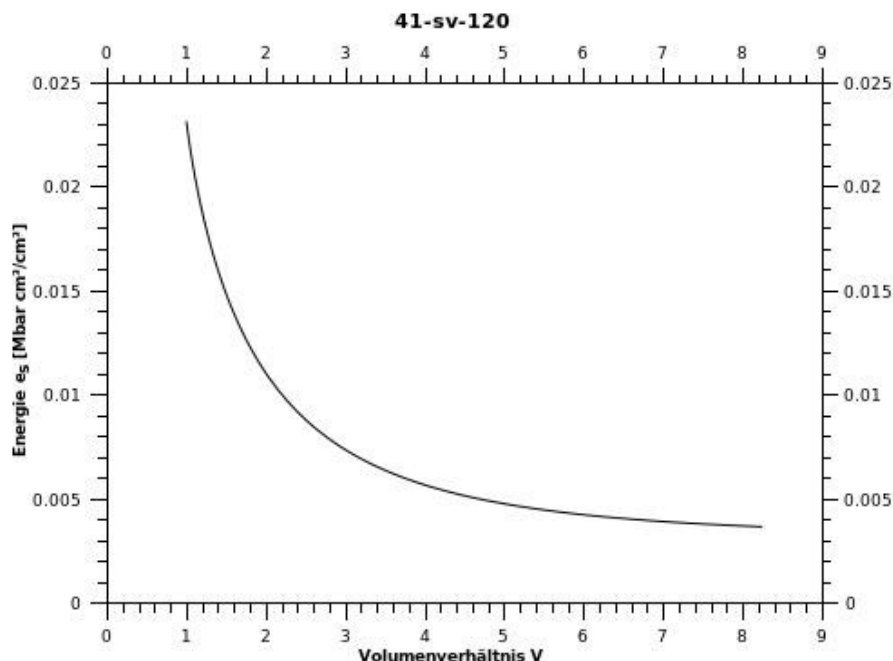


Abbildung 4.2.1: Energie-Volumen-Kurve eines Emulsionssprengstoffes.

Die Ermittlung der Parameter erfolgte mit Hilfe von Ausgleichsfunktionen mit dem Programm QTILOT®.

Zunächst wurden die Parameter C und ω aus dem letzten Term der energetischen JWL-Zustandsgleichung mit Hilfe der Funktion

$$e_{s,1} = \frac{C}{\omega \cdot V^\omega} \quad (2.4.32)$$

erhalten. MILLER und ALEXANDER (1989) nutzten hierfür eine Zwei-Punkt-Bestimmung im Bereich von $V \geq 6$. Bei den hier vorliegenden Sprengstoffen führte die Betrachtung des Bereiches von $V \geq 6$ jedoch nicht zu sinnvollen Ergebnissen. Stattdessen wurde der Volumenbereich von $1 \leq V \leq 8$ gewählt. (Abbildung 4.2.2)

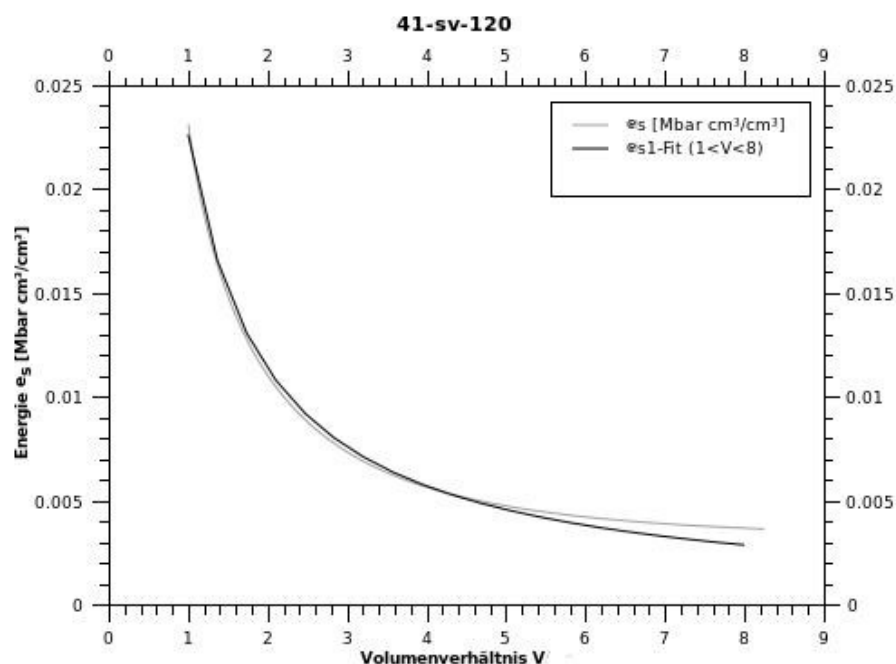


Abbildung 4.2.2: Erste Fitting-Analyse zur Bestimmung der Parameter C und ω am Beispiel eines Emulsionssprengstoffes.

Im nächsten Schritt wurden die Parameter B und R_2 ermittelt. Die Ergebnisse für C und ω aus dem vorhergehenden Schritt wurden dabei mit einbezogen.

Die verwendete Ausgleichs-Funktion hatte die Form

$$e_{S,2} = \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{\omega \cdot V^\omega} \quad (2.4.34)$$

Der Bereich, in dem die Ausgleichsfunktion angewandt wurde, lag zwischen $2,5 \leq V \leq 6$. (Abbildung 4.2.3)

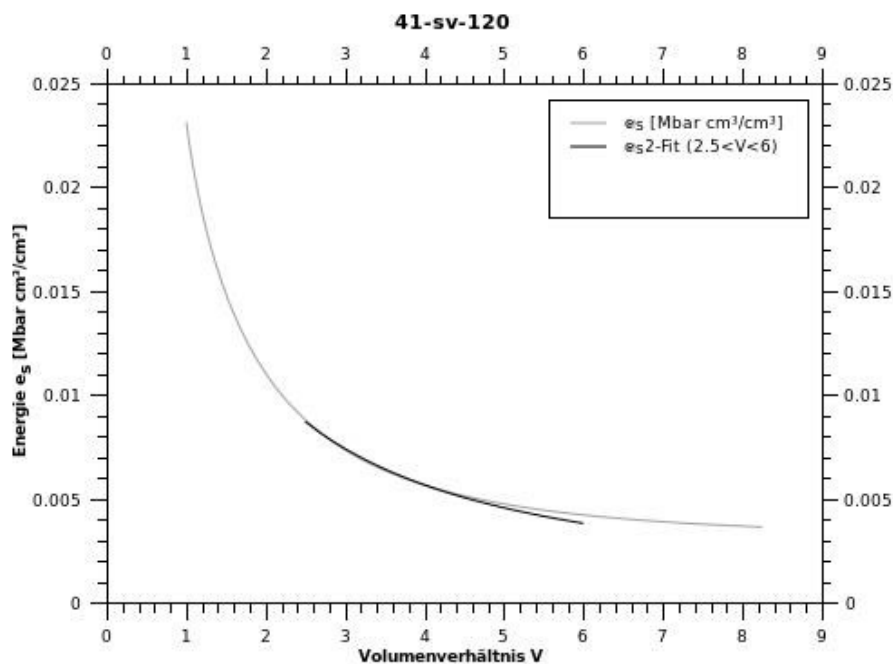


Abbildung 4.2.3: Zweite Fitting-Analyse zur Bestimmung der Parameter B und R_2 am Beispiel eines Emulsionssprengstoffes.

Im letzten Schritt wurden die vier bereits ermittelten Parameter C , ω , B und R_2 in die Gesamtgleichung eingesetzt und die Energie-Kurve mit der Funktion

$$e_{S,3} = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-R_1 \cdot V} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{C}{\omega \cdot V^\omega} \quad (2.4.36)$$

gefittet, wodurch die Parameter A und R_1 erhalten werden. Der verwendete Volumenbereich lag bei $1 \leq V \leq 2,5$. (Abbildung 4.2.4)

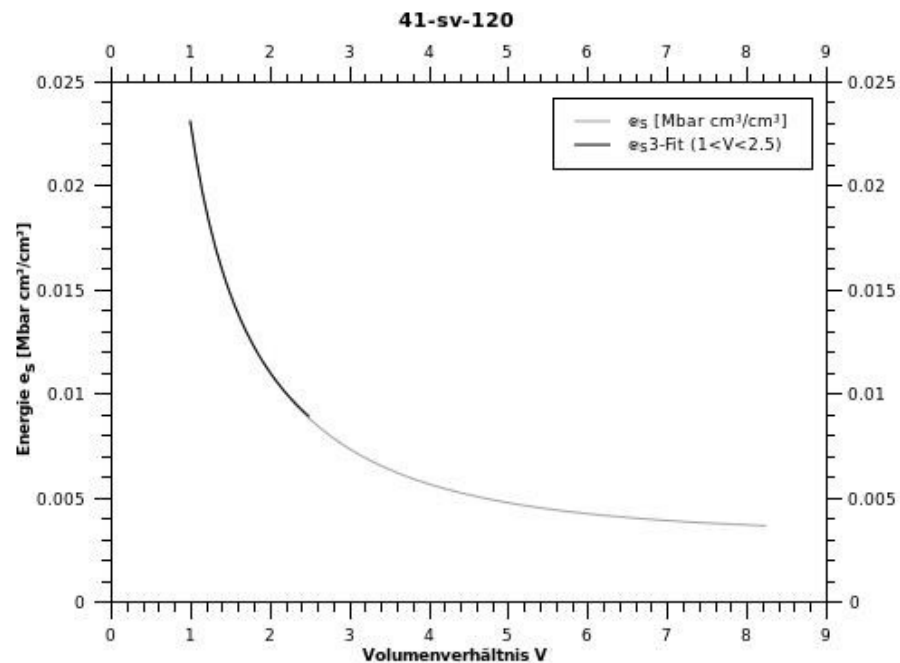


Abbildung 4.2.4: Dritte Fitting-Analyse zur Bestimmung der Parameter A und R_1 am Beispiel eines Emulsionssprengstoffes.

Die so erhaltenen, gemittelten Parameter der JONES-WILKINS-LEE-Zustandsgleichung sind in der Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Tabelle 4.5: JWL-Parameter der untersuchten Sprengstoffe.

Sprengstoff	A [Mbar]	B [Mbar]	C [Mbar]	R_1	R_2	ω
"Andex"	0,2772	-0,0570	0,0097	2,0000	1,1732	0,3557
"Wetter-Westfalit C"	0,2011	-0,0241	0,0030	2,1888	1,1190	0,1517
Emulsion ("Emu")	0,7323	-0,2715	0,0183	2,4200	1,7277	0,8476
TNT	0,1917	-0,0221	0,0140	2,0286	1,0905	0,3619
"Supergel 30"	0,6651	-0,1524	0,0245	1,9509	1,2281	0,4680

Bei den in der Literatur untersuchten militärischen Sprengstoffen liegt der Wert von ω üblicherweise bei 0,2 bis 0,4. Für "Andex" und TNT wurden diese Werte ebenfalls gefunden. Der ω -Wert des gelatinösen Sprengstoffs liegt etwas höher, der des Wettersprengstoffs etwas niedriger. Nur der Wert für die Emulsionen ist deutlich höher. Die Reihenfolge der Sprengstoffe mit steigenden ω -Werten entspricht der der radialen Ausdehnung bzw. der GURNEY-Energien – mit Ausnahme der Emulsionssprengstoffe.

Das Verhältnis zwischen R_1 und R_2 ist bei allen hier untersuchten Sprengstoffen ungefähr 2. Dies entspricht nicht dem in der Literatur üblichen Verhältnis von ungefähr 4 zwischen den beiden Parametern. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass es sich hier nicht um annähernd ideal detonierende militärisch genutzte Sprengstoffe handelt, sondern um zivil genutzte Sprengstoffe, deren Detonationsverhalten durchaus vom idealen Charakter abweichen kann.

Die ermittelten Werte für den Parameter B sind überwiegend negativ. Dies ist im Vergleich mit Literaturwerten für andere Sprengstoffe untypisch, aber auch durchaus möglich. (vgl. z. B. HORNBERG 1986)

Eine analoge Bestimmung der JWL-Parameter durch partielles Fitting der Druck-Volumen-Kurven wurde nicht weiter verfolgt, da die Reproduzierbarkeit bereits bei den ω - und C-Werten auf Grund der großen Annäherung der Druck-Kurven nicht gegeben war.

4.2.2. Beurteilung des Verfahrens

Das hier angewandte Verfahren des „partiellen Fittings“ ist eine Annäherung der JWL – Parameter an den ermittelten Energie-Verlauf in Abhängigkeit des Volumenverhältnisses. Zum Vergleich wurde in Abbildung 4.2.5 die Energie-Volumen-Kurve eines ANFO-Sprengstoffes aufgetragen. Die durchgezogene Linie stellt dabei den aus den Zylindertestdaten erhaltenen Energie-Verlauf dar, die gestrichelte Linie zeigt den aus der JWL-Gleichung berechneten Verlauf.

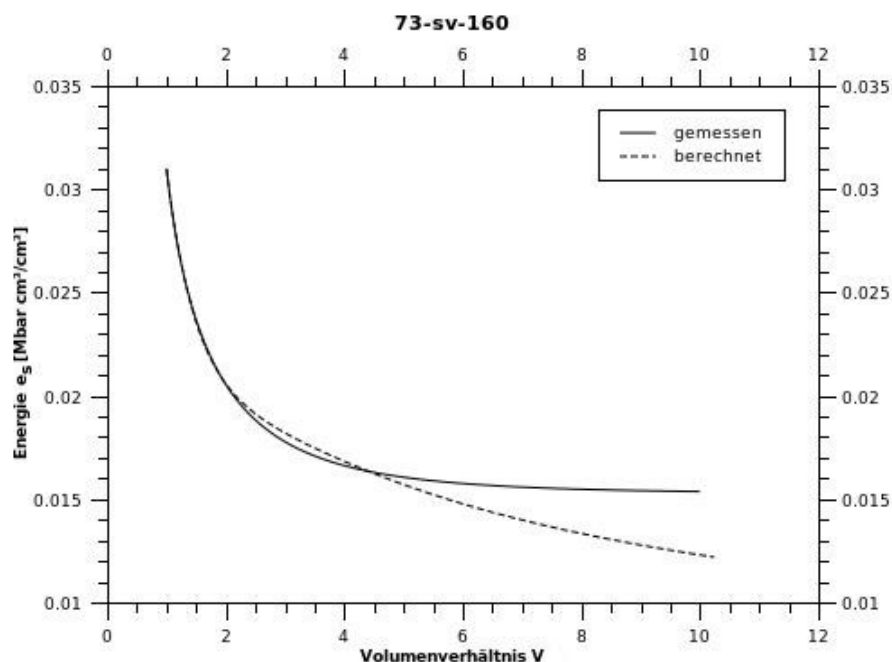


Abbildung 4.2.5: Darstellung der isentropen Energie in Abhängigkeit vom Volumenverhältnis aus den Zylindertestdaten (durchgezogene Linie) und mit Hilfe der JWL-Parameter berechnet (gestrichelte Linie).

Es ist deutlich zu erkennen, dass die JWL-Gleichung nur im Bereich von kleinen Volumina, d. h. bei hohen Drücken, mit den Testdaten übereinstimmt. Mit zunehmender Volumenausdehnung, also bei abnehmendem Druck, nimmt die Abweichung zu. Dies bedeutet, dass die ermittelten JWL-Parameter nur für den Zeitraum nach der beginnenden Expansion der Sprengschwaden bis zu einem Volumenverhältnis von ungefähr $V = 5$ sinnvolle Ergebnisse liefern. Dies entspricht einer Vergrößerung des inneren Radius um ca. 25 mm. Für die spätere Expansion des Zylinders aufgrund der Ausbreitung der Explosionsschwaden liefert die JWL-Gleichung keine genauen Ergebnisse mehr.

Tabelle 4.6: Gegenüberstellung der Literaturangaben der JWL-Parameter für TNT und ANFO mit den hier ermittelten Parametern (grau hinterlegt).

Sprengstoff	A [Mbar]	B [Mbar]	C [Mbar]	R_1	R_2	ω
TNT ¹	4,5486	0,10119	0,01093	4,5	1,5	0,25
TNT ²	3,712	0,03231	0,01045	4,15	0,95	0,3
TNT ³	3,62033	0,02492	0,008	4,07257	0,88784	0,25
TNT	0,1917	-0,0221	0,0140	2,0286	1,0905	0,3619
ANFO ³	0,87611	0,00798	0,00711	4,30566	0,89071	0,35
ANFO ⁴	0,7518	-0,00818	0,0117	4,1	1,25	0,44
"Andex"	0,2772	-0,0570	0,0097	2,0000	1,1732	0,3557

¹ SOURS *et al.*, 1995

² COOPER, 1998

³ HORNBERG, 1986 (vom Autor ermittelt)

⁴ HORNBERG, 1986 (vom Autor zitiert)

In Tabelle 4.6 sind die JWL-Parameter für TNT und einem ANFO-Sprengstoff aufgeführt, welche in der Literatur zu finden sind.

Schon bei den Literaturwerten für TNT und ANFO wird deutlich, dass die Ermittlung der JWL-Parameter stark von den Versuchsbedingungen und vor allem von der Qualität der Fitting-Funktionen abhängig ist. Bei einem System mit 6 unbekannten Parametern wird es immer mehrere mögliche Lösungen geben.

Beim Vergleich der Literaturwerte für TNT und ANFO mit den im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werten wird deutlich, dass die Werte für ω , C und R_2 relativ gute Übereinstimmungen zeigen. Die Werte für A und R_1 weichen hingegen von den Literaturwerten ab.

In der Abbildung 4.2.6 sind die errechneten Energiekurven aus den oben genannten JWL-Parametern für TNT in Abhängigkeit des Volumenverhältnisses aufgetragen.

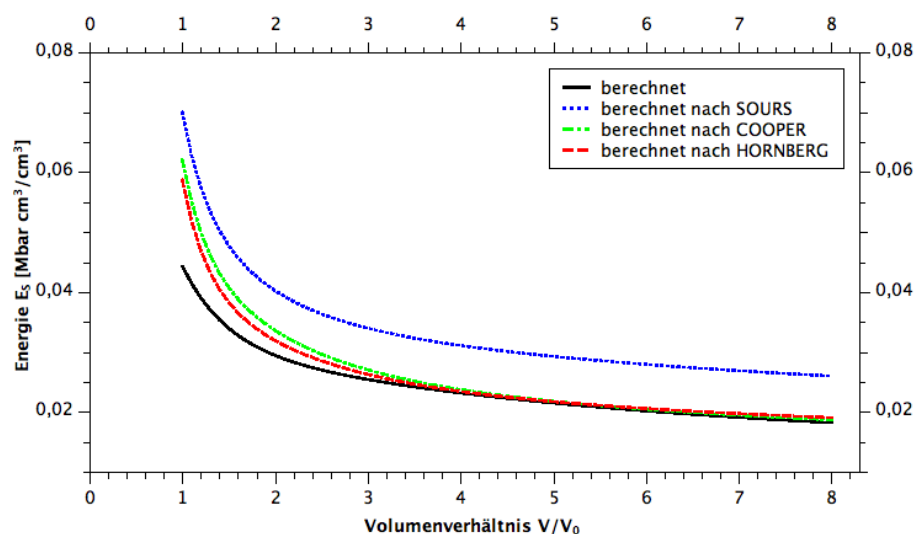


Abbildung 4.2.6: Energie-Volumen-Diagramm für TNT, berechnet aus den JWL-Parametern dieser Arbeit und den in der Literatur befindlichen Angaben

Es wird deutlich, dass die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Parameter – besonders ab einem Volumenverhältnis von 3 – annähernd gleiche Energie-Verläufe aufweisen, wie die von COOPER und HORNBERG ermittelten JWL-

Parameter. Weiterhin wird deutlich, dass auch die in der Literatur befindlichen Werte durchaus abweichende Kurven ergeben können. Besonders deutlich wird dies bei der aus den Werten von SOURS ermittelten Kurve.

Abbildung 4.2.7 zeigt die berechneten Energie-Verläufe von ANFO. Hier ist die Abweichung der Energie-Kurven etwas höher. Aber auch hier wird der Unterschied zwischen den verschiedenen Literaturwerten wieder sehr deutlich.

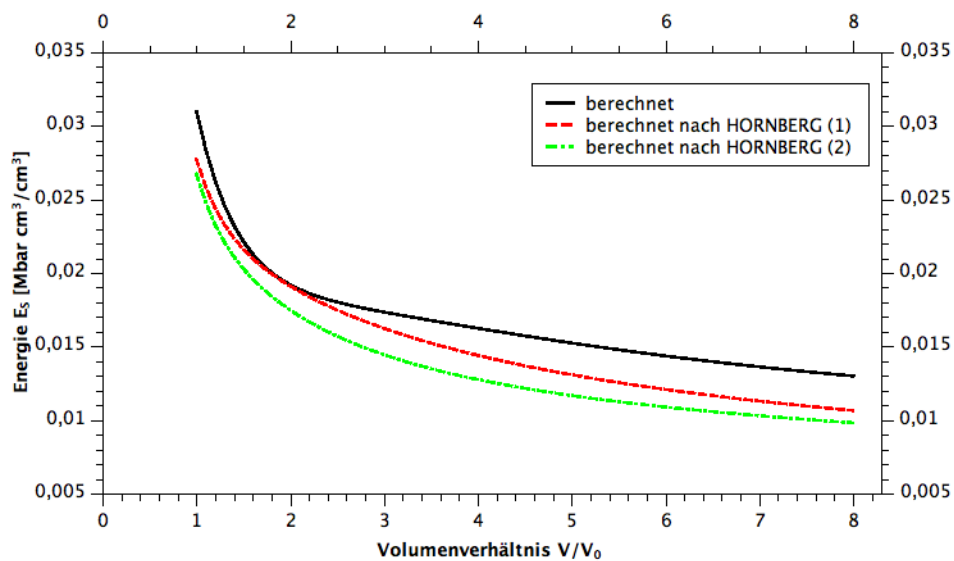


Abbildung 4.2.7: Energie-Volumen-Diagramm für ANFO, berechnet aus den JWL-Parametern dieser Arbeit und den in der Literatur befindlichen Angaben

Die Abweichung der einzelnen errechneten Energie-Kurven zeigt deutlich, dass für eine komplexe Zustandsgleichung mit insgesamt 6 Parametern keine eindeutige Lösung zu finden ist. Das hier vorgestellte Verfahren des „partiellen Fittings“ bietet aber eine einfache Möglichkeit zur Annäherung der Parameter ohne Computer-Codes.

4.2.2.1. Genauigkeit des Verfahrens

Die Bestimmung der JWL-Parameter erfolgte durch ein Fitting-Verfahren. Je mehr Parameter ermittelt wurden, desto geringer wird die Ungenauigkeit der

gefitteten Kurven. Für die Parameter C und ω , die durch das erste Fitting ermittelt wurden, liegt die Abweichung zur eigentlichen Energie-Kurve bei durchschnittlich 4,5 % bis zu 10,5 %. Da bei den Emulsionssprengstoffen „Emu“ der überwiegende Teil der Energiekurven extrapoliert werden musste, um ein Volumenverhältnis von $V = 8$ darstellen zu können, liegt hier der mittlere Fehler bei dem ersten Fitting-Durchgang sogar bei ca. 17 %.

Für die JWL-Parameter B und R_2 , die durch das zweite Fitting ermittelt wurden, konnte eine durchschnittliche Abweichung von 1,2 % bis 4,5 % ermittelt werden. Bei den Emulsionssprengstoffen „Emu“ lag auch hier die Abweichung mit durchschnittlich 8,5 % höher. Nur bei den durch das dritte Fitting ermittelten JWL-Parametern A und R_1 glich sich die Abweichung an. Hier lag die durchschnittliche Abweichung bei 0,7 % bis 3,3 %.

Für alle Parameter konnte festgestellt werden, dass der Fehler umso geringer wurden, je größer die Energieänderung bei höheren Volumenverhältnissen war.

4.3. Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren der Zylindertests auch für zivil genutzte Sprengstoffe angewendet werden kann. Diese detonieren i. d. R. langsamer als viele militärisch genutzte Sprengstoffe und sie weichen zumindest teilweise vom idealen Detonationsverhalten ab. Der überwiegende Teil militärisch genutzter Sprengstoffe weist dagegen ein meist annähernd ideales Detonationsverhalten auf. Dennoch waren die Ergebnisse der untersuchten Zylinderwandaufweitungen mit einer Streuung von unter 10 % reproduzierbar.

Wichtig ist auch hier, wie bei allen Versuchen zur Charakterisierung eines Sprengstoffes, dass der Explosivstoff homogen ist. Der Einschluss von Luftblasen – wie es beim "Emulgit 42G" der Fall war – führt nicht zu reproduzierbaren Ergebnissen.

Die eingesetzte Kamera zählt mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1.000.000 Bildern pro Sekunde zu den weltweit schnellsten Highspeedkameras. Allerdings

ist die Bildgröße technisch bedingt auf 312 x 260 Pixel beschränkt. Dies hat zur Folge, dass die Rohrbreiten in den Filmaufnahmen bei einer Entfernung von ca. 60 m zwischen Kamera und Versuchsobjekt bei 26 bis 32 Pixel lagen. Die Versuche zeigten, dass bei dieser Entfernung die in den Weg-Zeit-Diagrammen dargestellten radialen Ausdehnungen sehr stufenförmig abgebildet wurden. Dies hatte direkte Auswirkungen auf die Genauigkeit der Ausgleichsfunktionen. Durch zusätzliche Schutzmaßnahmen konnten die letzten Versuche mit einer Entfernung von ca. 17 m zwischen Rohr und Kamera durchgeführt werden. Die radialen Ausdehnungen konnten bei diesen Versuchen wesentlich feiner abgebildet werden. Abbildung 4.3.1. zeigt die radiale Ausdehnungsgeschwindigkeit eines ANFO-Sprengstoffes bei einem Abstand zwischen Zylinder und Kamera von ca. 60 m, Abbildung 4.3.2. zeigt die Radialgeschwindigkeit des gleichen Sprengstoffes bei einem Abstand von 17 m.

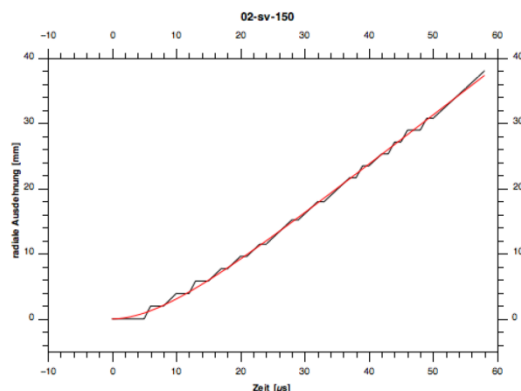


Abbildung 4.3.1: Radiale Expansionsgeschwindigkeit von "Andex", aufgezeichnet in einem Abstand von ca. 60 m zur Kamera

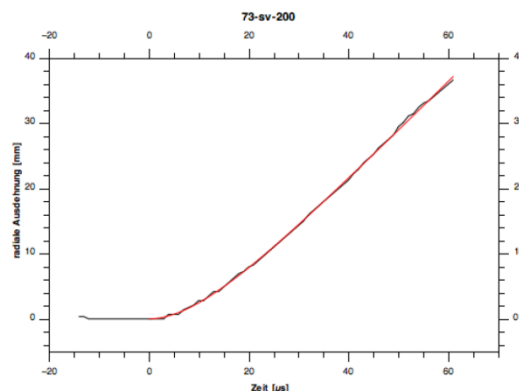


Abbildung 4.3.2: Radiale Expansionsgeschwindigkeit von "Andex", aufgezeichnet in einem Abstand von ca. 17 m zur Kamera

Der zunächst exponentielle Anstieg der radialen Ausdehnungsgeschwindigkeiten zu Beginn der Expansion konnte in den Kurven deutlich besser wiedergegeben werden. Der Messfehler ging deutlich zurück, da die Rohre im Ausgangszustand nun eine Breite von 50 bis 100 Pixel auf den Filmaufnahmen hatten. Für zukünftige Versuche sollte der Abstand zwischen Rohr und Kamera also so

gewählt werden, dass das Rohr im Ausgangszustand ein Drittel bis die Hälfte der Bildbreite einnimmt, je nach Detonationsgeschwindigkeit des zu untersuchenden Sprengstoffes.

Auch wenn die Genauigkeit einer kontinuierlichen Darstellung analoger Streakaufzeichnungen nicht erreicht werden konnte, so bietet die hier verwendete Methode gegenüber der Aufzeichnung mit Hilfe von Kurzschlusspins deutlich mehr Messpunkte. Der Vorteil der im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Auswertungsmethode im Vergleich zu den beiden bisherigen Methoden liegt in der nachträglichen Auswahl der Zeilen einer Filmaufnahme, aus der die Streakansichten generiert werden. Die Reproduzierbarkeit der Werte der radialen Ausdehnungsgeschwindigkeit und somit auch der GURNEY-Energien und JWL-Parameter können durch die Wahl der ausgewerteten Zeilen beeinflusst werden. Störende Hintergrundeffekte durch ungleichmäßige Beleuchtung oder Ungleichmäßigkeiten in der Rohraufweitung durch z. B. inhomogene Sprengstoffbefüllung können besser berücksichtigt werden als bei den Methoden der direkten Streakaufzeichnung oder der Messung mit Kurzschlusspins. Des Weiteren werden pro Filmaufnahme mehrere Datenreihen generiert, die wiederum Rückschlüsse auf die homogene Verteilung des Sprengstoffes innerhalb des Rohres zulassen.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass ein einzelnes Bild - bei Kenntnis der Detonationsgeschwindigkeit - ausreichend ist, um die Radialgeschwindigkeit und im weiteren Schritt die GURNEY-Energie zu bestimmen. Aber die Versuche zeigten, dass diese Methode im Vergleich zur Streakauswertung Nachteile aufweist. Zum einen waren nur wenige Einzelbilder eines Filmes für diese Auswertungsmethode geeignet, zum anderen wurde die Zeitachse nicht wie bei der Streakmethode durch die zeitliche Abfolge der einzelnen Bilder eines Filmes vorgegeben, sondern mit Hilfe der gemessenen Detonationsgeschwindigkeit bestimmt. Dadurch summierten sich die Messfehler. Dies hatte zur Folge, dass die Ergebnisse unter den gegebenen Versuchsbedingungen bei der

Einzelbildauswertung z.T. stark von den Ergebnissen der Streakauswertung abweichen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb die Möglichkeiten dieser Methode nicht weiter verfolgt.

Die Parameter der JONES-WILKINS-LEE-Zustandsgleichung wurden nacheinander durch Fitting mit Hilfe einzelner Terme der JWL-Gleichung bestimmt. Diese Methode des partiellen Fittings ist eine einfache Möglichkeit zur Ermittlung der JWL-Parameter aus den Daten der Zylinderexpansionstests und der Detonationsgeschwindigkeit.

Die hier gewonnenen Parametersätze der JWL-Zustandsgleichung sind erste Startwerte. Im Vergleich mit ggf. vorhandenen Literaturwerten wird gerade für die letzten beiden ermittelten Parameter A und R_1 eine deutliche Abweichung festgestellt. Bei so komplexen Gleichungen wie die JWL-Zustandsgleichung wird es immer zu Abweichungen der Werte kommen, da die Zahl der experimentell gewonnenen Daten begrenzt ist.

In der BAM finden erste Versuche statt, Simulationsrechnungen mit den hier erhaltenen Parametersätzen für die JWL-Zustandsgleichung und experimentelle Versuche miteinander zu vergleichen. Diese Ergebnisse lagen jedoch zum Abschluss dieser Arbeit noch nicht vor.

5. Zusammenfassung

Es wurden eine Reihe von Zylindertests mit Vertretern unterschiedlicher Gruppen zivil genutzter Sprengstoffe durchgeführt. Dabei wurden die Sprengstofftypen ausgewählt, die im gewerblichen Bereich weit verbreitet sind. Neben einem ANFO-Sprengstoff und verschiedenen Emulsionssprengstoffen wurden noch ein Wettersprengstoff und ein gelatinöser Sprengstoff dem Zylindertestverfahren unterzogen. Damit waren alle wichtigen Gruppen der Gesteinssprengstoffe, d. h. Sprengstoffe, die im Bergbau und in Steinbrüchen ihren Einsatz finden, vertreten. Zusätzlich wurde noch geschupptes TNT und ein militärischer Sprengstoff untersucht, um Vergleichswerte zu erhalten.

Es kam eine im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Aufnahmetechnik zum Einsatz, die es erlaubt, den schnellen, dynamischen Verlauf der Zylinderwandaufweitung auf einem Teilstück des Rohres von 20 bis 25 cm Länge zu beobachten. Dazu wurde der Verlauf der seitlichen Rohraufweitung infolge der Detonationswirkung mit einer Ultra-Highspeedkamera mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1.000.000 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet. Dieses bildgebende Verfahren hat gegenüber der klassischen Streaktechnik und der Technik, die Aufweitung mittels Kurzschlusspins aufzuzeichnen, den großen Vorteil, dass Unregelmäßigkeiten, wie z. B. das frühzeitige Aufreißen des Rohres, erkannt und berücksichtigt werden können. Darüber hinaus ist es möglich, mehrere Messdatenreihen der radialen Ausdehnungsgeschwindigkeit aus einer einzelnen Aufnahme zu gewinnen. Dadurch lassen sich die Radialgeschwindigkeiten mit höherer Messsicherheit bestimmen, und es ist auch möglich, Rückschlüsse auf die Homogenität der Sprengstofffüllung zu ziehen.

Aus den aufgezeichneten Zylinderexpansionen lassen sich die radiale Ausdehnungsgeschwindigkeit, die GURNEY-Energie, die GURNEY-Geschwindigkeit und die Parameter der JWL-Zustandsgleichung der jeweiligen Sprengstoffe bestimmen. Abbildung 5.1 fasst die einzelnen Schritte der erfolgten Auswertung sowie die dabei erhaltenen Größen und Diagramme schematisch zusammen.

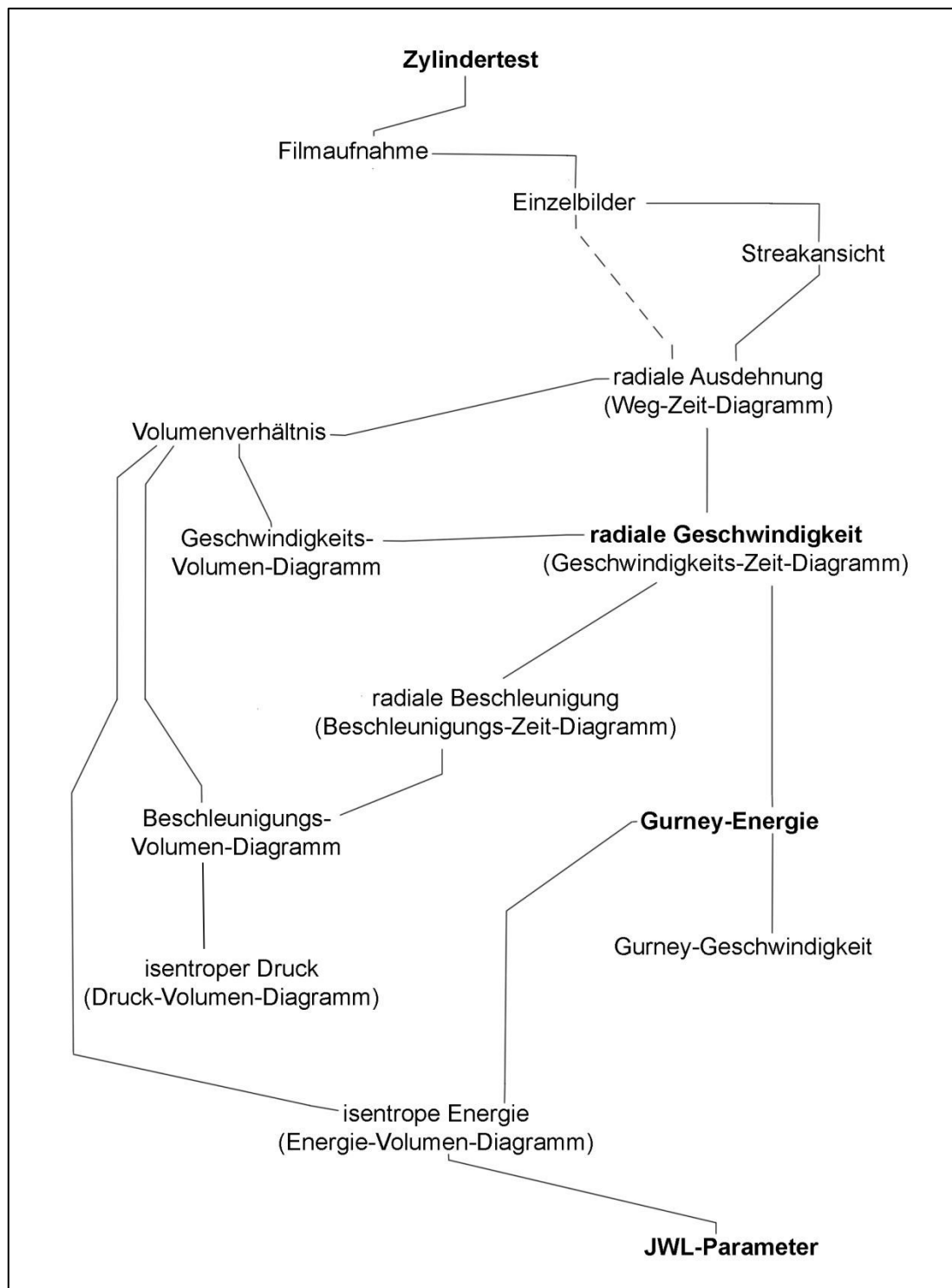


Abbildung 5.1: Schematischer Überblick über den Zusammenhang der durch Zylindertests erhaltenen Diagrammdaten.

Aus den erhaltenen Filmaufnahmen wurden zunächst die Einzelbilder extrahiert. Nach Betrachtung der Aufnahmen wurden i. d. R. drei Zeilen ausgewählt, von denen streakähnliche Ansichten generiert wurden. Aus diesen Streakansichten konnte mit Hilfe eines einfachen Computerprogrammes die radiale Expansion bewertet werden.

Aus den Ergebnissen der zeitabhängigen radialen Ausdehnungen konnten durch zeitliche Ableitung die radialen Ausdehnungsgeschwindigkeiten bestimmt werden. Diese konnten zur Berechnung der GURNEY-Energien und GURNEY-Geschwindigkeiten der einzelnen Sprengstoffe verwendet werden. In der Tabelle 5.1 sind die GURNEY-Energien und GURNEY-Geschwindigkeiten der untersuchten Sprengstoffe zusammengefasst.

Tabelle 5.1: GURNEY-Energien und -Geschwindigkeiten der untersuchten Sprengstoffe

Sprengstoff	GURNEY-Energie e_G [MJ/kg]	GURNEY-Geschw. v_G [km/s]
"Andex"	1,66	1,83
"Wetter-Westfalit C"	0,63	1,12
"Emu" (<i>chemical gassing</i>)	1,39 bis 2,93	1,67 bis 2,29
"Dumbo" (Mikrohohlkörper)	1,98 bis 2,08	1,99 bis 2,04
"TNT, geschuppt"	2,24	2,11
"Supergel 30"	2,30	2,07

Die erhaltenen Werte erlauben eine Einordnung der Sprengstoffe hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Energie. Dadurch ist eine Charakterisierung bezüglich der Arbeitsleistung der untersuchten Sprengstoffe möglich.

Ferner konnte gezeigt werden, dass der für meist ideal detonierende, militärisch genutzte Sprengstoffe gefundene Zusammenhang zwischen Detonationsgeschwindigkeit v_D und GURNEY-Geschwindigkeit v_G von

$$\frac{v_D}{v_G} \approx 3. \quad (5.1)$$

bei den häufig nicht ideal detonierenden, zivil genutzten Sprengstoffen nicht anwendbar ist.

Die radialen Ausdehnungsgeschwindigkeiten boten des Weiteren die Grundlage zur Ermittlung der Energiekurven des beobachteten Detonationsverlaufes unter der Annahme, dass die Entropie konstant gehalten wurde. Aus den ermittelten Energiekurven konnten dann durch sogenanntes partielles Fitting die Parameter der JONES-WILKINS-LEE-Zustandsgleichung erhalten werden. Bei diesem Verfahren werden nacheinander die Terme der JWL-Gleichung auf die Energiekurven angewendet und durch dieses Fitting die Parameter bestimmt. Die so ermittelten JWL-Parameter der untersuchten Sprengstoffe sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: JWL-Parameter der untersuchten Sprengstoffe

Sprengstoff	A [Mbar]	B [Mbar]	C [Mbar]	R_1	R_2	ω
"Andex"	0,2772	-0,0570	0,0097	2,0000	1,1732	0,3557
"Wetter-Westfalit C"	0,2011	-0,0241	0,0030	2,1888	1,1190	0,1517
Emulsion ("Emu")	0,7323	-0,2715	0,0183	2,4200	1,7277	0,8476
TNT	0,1917	-0,0221	0,0140	2,0286	1,0905	0,3619
"Supergel 30"	0,6651	-0,1524	0,0245	1,9509	1,2281	0,4680

Die ermittelten JWL-Parameter bieten die Grundlage für spätere sprengstoffspezifische Simulationsrechnungen zur Darstellung des Stoßwellendrucks bei Detonationen.

6. Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nur eine kleine Auswahl an Sprengstoffen untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Zylindertests mit zivil genutzten Sprengstoffen möglich sind. Da die Auswahl an zivil genutzten Sprengstoffen groß ist, ist es erstrebenswert weitere Sprengstoffe hinsichtlich ihres Arbeitsvermögens zu untersuchen. So bieten Emulsionssprengstoffe mit ihren unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen die Möglichkeit, z. B. den Einfluss unterschiedlicher Emulgatoren und Emulgatoremischungen auf die Expansionsgeschwindigkeit und somit auf die GURNEY-Energie zu untersuchen. Weiterhin kann die Wirkung von Zusätzen wie Aluminium oder Perchloraten auf die GURNEY-Energie untersucht werden. Interessant wäre auch die Überprüfung, inwiefern die Korngröße bei ANFO-Sprengstoffen oder die Gasblasengröße bei gleichbleibender Dichte der Emulsionssprengstoffe eine Rolle bei der Ausdehnungsgeschwindigkeit spielt und somit die GURNEY-Energie beeinflussen kann.

Durch Versuche mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern kann der Einfluss des Sprengstoffdurchmessers auf die radiale Expansionsgeschwindigkeit untersucht werden.

Auf Grund dieser Untersuchungen ist es möglich, Faktoren wie chemische Zusätze, Korngröße oder auch Ladungsdurchmesser hinsichtlich ihres Einflusses auf das Arbeitsvermögen des Sprengstoffes einzuordnen. Durch die Anpassung dieser einzelnen Sprengstoffparameter an die gegebenen Bedingungen ergibt sich die Möglichkeit den Sprengstoffbedarf zu optimieren.

Zukünftige Zylindertests sollten so aufgebaut werden, dass der Rohrdurchmesser im Ausgangszustand - je nach Detonationsgeschwindigkeit des zu untersuchenden Sprengstoffes - ein Drittel bis die Hälfte der Bildbreite einnimmt. Auf diese Weise können mit der Ultra-Highspeedkamera "HIV-5" bestmögliche Ergebnisse erzielt werden.

Die hier gezeigte Methode bietet die Möglichkeit, die JWL-Parameter ziviler Sprengstoffe in einfacher Weise zu bestimmen. Bei späteren

Zylinderexpansionstests ist es wünschenswert, neben den Daten der Zylinderaufweitung und der Detonationsgeschwindigkeit weitere Detonationsparameter (z. B. Druck) aufzuzeichnen. Dadurch ergeben sich weitere Berechnungsmöglichkeiten. Durch Kenntnis des Detonationsdruckes lassen sich z. B. mit Hilfe des Polytropenexponenten γ die Parameter A und R_1 der JWL-Gleichung ermitteln. Dazu werden die Darstellungen der JWL-Zustandsgleichungen für den isentropen Druck (Gleichung 2.4.13), die isentrope innere Energie (Gleichung 2.4.28) und den Impuls (Gleichung 4.2.3) für den CHAPMAN-JOUGUET-Punkt gelöst.

$$p_s = A \cdot e^{-V \cdot R_1} + B \cdot e^{-V \cdot R_2} + \frac{C}{V^{\omega+1}}, \quad (2.4.13)$$

$$e_s = \frac{A}{R_1} \cdot e^{-V \cdot R_1} + \frac{B}{R_2} \cdot e^{-V \cdot R_2} + \frac{C}{\omega \cdot V^\omega} \quad (2.4.28)$$

und

$$\rho_0 \cdot v_D^2 = A \cdot R_1 \cdot e^{-V \cdot R_1} + B \cdot R_2 \cdot e^{-V \cdot R_2} + \frac{C \cdot (\omega + 1)}{V^{\omega+2}} \quad (4.2.3)$$

$$\text{mit } p_{CJ} = \frac{\rho_0 \cdot v_D^2}{\gamma + 1} \text{ und } V_{CJ} = \frac{\gamma}{\gamma + 1}.$$

Die Werte für die Detonationsgeschwindigkeit v_D , den Druck sowie das Volumen am CJ-Punkt p_{CJ} und V_{CJ} und die Dichte des Explosivstoffes ρ_0 sind bekannt, die vier JWL-Parameter B , C , R_2 und ω lassen sich wie beschrieben über partielles Fitting ermitteln.

Hydrothermochemische Computercodes – wie z. B. CHEETAH – bieten Möglichkeiten die JWL-Parameter aus den Ergebnissen der Zylindertests zu bestimmen. Neben der radialen Expansion werden dafür ebenfalls Angaben zur Detonationsgeschwindigkeit und zum Detonationsdruck benötigt.

Inwieweit die so ermittelten JWL-Parameter realitätsnähere Ergebnisse liefern, könnte Bestandteil weiterer Forschungsarbeiten sein.

Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmten JWL-Parameter bieten zunächst die Grundlage numerischer Simulationen zivil genutzter Sprengstoffe. Die Überprüfung experimenteller Daten mit numerischen Simulationsergebnissen ist Bestandteil weiterer Forschungen. Dazu wird die BAM zunächst die Simulation von einigen geplanten Versuchen durchführen, um die Ergebnisse der Experimente mit denen der Simulation zu vergleichen. Dieser Vergleich gibt die Möglichkeit die ermittelten GURNEY-Energien und JWL-Parameter der einzelnen Sprengstoffe hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Eignung für Simulationszwecke zu überprüfen. In diesem Zusammenhang ist es möglich, durch numerische Berechnungen sprengstoffspezifische Parametersätze zu bestimmen, für die die JWL-Zustandsgleichung die bestmögliche Genauigkeit widerspiegelt. Dies ermöglicht dann die Simulationsrechnungen noch realitätsnäher durchzuführen, was wiederum die Effektivität und Aussagekraft dieser Simulationen erhöht.

Durch den Einsatz von computergestützten hydrothermochemischen Codes (z. B. CHEETAH) kann der Prozess der JWL-Parameterbestimmung automatisiert werden. Dies würde eine effektivere Bestimmung der JWL-Parameter ermöglichen.

Besonders interessant ist die Überprüfung der hier ermittelten JWL-Parameter hinsichtlich ihrer Eignung für sprengstoffspezifische Simulationen. Die sicherheitstechnischen Kenndaten in der Unfallverhütungsvorschrift der Berufsgenossenschaft zur baulichen Anordnung und zu Sicherheitsabständen beim Umgang mit Explosivstoffen können durch sprengstoffspezifische Simulationen mit Hilfe der hier ermittelten JWL-Parameter überprüft werden. Entsprechende Simulationen sind in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) bereits geplant. Dadurch soll eine Überprüfung der geforderten Sicherheitsabstände für Sprengstofflager und Produktionsstätten stattfinden.

Interessant sind auch weitere Versuche zum Vergleich des hier angewandten bildgebenden Aufnahmeverfahrens mit den klassischen Aufnahmetechniken. Die

Versuchsreihen können die Vor- und Nachteile der Ultra-Highspeedaufnahmen gegenüber der Streakaufnahmetechnik oder der Kurzschlusspin-Technik aufzeigen. Des Weiteren bietet das Einzelbildverfahren zur Auswertung der Radialgeschwindigkeit zahlreiche Möglichkeiten zur Optimierung, um die Bestimmung der Radialgeschwindigkeit zu vereinfachen. So könnten Versuche mit einer exakt triggerbaren Kamera mit geringerer zeitlicher, aber höherer optischer Auflösung besser aufgelöste Ausdehnungskurven liefern. Dies minimiert wiederum den Messfehler bei der Bestimmung der radialen Ausdehnungsgeschwindigkeit. Die Messung der Detonationsgeschwindigkeit bei einer großen Anzahl von Zylindertests erhöht die statistische Sicherheit und verringert somit den Fehler bei der Generierung der Zeitachse. Auch eine zweite Messmethode der Detonationsgeschwindigkeit, z. B. durch optische Start-Stopp-Messung, ist denkbar.

Eine ausgedehntere Untersuchung der Splitter hinsichtlich ihrer Form und Größe kann zu aufschlussreichen Ergebnissen in Hinblick auf die Abhängigkeit der GURNEY-Energie auf die Splitterbildung führen. In diesem Zusammenhang kann auch untersucht werden, inwiefern die von MOTT (1943) und GRADY (2006) genannten Zusammenhänge bezüglich der Rissanzahl und des Rissabstandes bei stahlummantelten Sprengladungen auch auf Kupferzylinder übertragbar sind. Denkbar wäre die Entwicklung eines Verfahrens zur Abschätzung des Arbeitsvermögens eines Sprengstoffes anhand seines Splitterbildes.

7. Abstract

The aim of this thesis was the determination of the GURNEY energy and the parameters of the JONES-WILKINS-LEE equation of state (JWL parameters) of a wide spectrum of the most commonly explosives for civil purpose. A so-called cylinder expansion test procedure was used for determining the test data of an ANFO explosive, a permissible, various emulsion explosives, an ammonium nitrate gelatine dynamite, a scaled TNT and a military explosive. The time-depended expansion of a copper cylinder filled with explosives was measured by a new recording technique. Hereby one of the worldwide latest ultra-highspeed cameras observed the fast and dynamic detonation process on a 20 - 25 cm section of the copper tube with a recording velocity of 1.000.000 pictures per second. This imaging measurement method is superior to the classical streak record method or to the measurement recorded by contact pins. Irregularities - such as early fracturing of the tube - can be recognized and considered. Furthermore, it is possible to win multiple data series of the radial expansion velocity at a single shot. Because of that the measurement accuracy of the radial velocities was increased and it was also possible to draw conclusions on the homogeneity of the explosives.

It was shown that the cylinder expansion tests can be used for civil explosives. Those are usually much slower than military explosives and can differ from ideal detonation behavior. Nevertheless, the results of the cylinder wall expansion were reproducible. It is also important, as in all the tests for the characterization of explosives, that the explosive material is homogeneous. The inclusion of air bubbles - as in "Emulgit 42G" - did not lead to reproducible results.

The recorded film consisted of images with a length of 100 μ s and a number of 100 frames - one frame per micro second. These frames were extracted. Usually three lines - the same in every frame of one film image - were

selected and extracted. By defragmenting the line-frames a streak view of the copper expansion were generated. Using a simple computer program the radial expansion could be measured from the streak views.

The radial expansion velocities were determined by derivation of the results of time-depended radial expansion. First, these expansion velocities could be used for calculating the GURNEY energy and the GURNEY velocity of the investigated civil explosives. Second, it provided the basis for determining the energy curves of the observed detonation process under the assumption that the entropy was held constant. From these calculated energy curves the parameters of the JONES-WILKINS-LEE equation of state are obtained by partially fitting with several terms of the JWL equation.

8. Literatur

Arnold, Werner. 2011. Technische Niederschrift. 2011-0012. Schrobenehausen : MBDA-TDW, 2011.

Baudin, G. und Serradeill, R. 2010. Review of Jones-Wilkins-Lee equation of state. Gramat, Frankreich : EPJ Web Conferences, 2010. 10, 00021.

Catanach, Richard, et al. 1999. Cylinder Test Specification. LA-13643-MS. Los Alamos, New Mexico, USA : Los Alamos National Laboratory, 1999.

Chen, C.-Y. und Shiuan, J.-H. 1994. The Equation of State of Detonation Products obtained from Cylinder Expansion Test. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1994, 19, S. 9-14.

Chéret, R. 1993. Chapter X. Experimental Methods, 1.1. Light Sources. *Detonation of Condensed Explosives*. New York : Springer-Verlag New York, Inc., 1993, S. 218-220.

Cooper, P.W. 1998. Introduction to Detonation Physics. [Buchverf.] Jonas A. Zukas und William P. Walters. *Explosive Effects and Applications*. New York : Springer Science + Business Media, 1998, S. 115-135.

Crowley, A.B. 2006. The Effect of Munition Casings on Reducing Blast Over-pressures. Shrivenham, UK : Cranfield University, 2006.

Danel, J.-F. und Kazandjian, L. 2004. A few remarks about the Gurney Energy of condensed explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2004, 29 (5), S. 314-316.

Davis, W.C. und Fraquignon, C. 1995. Classical Theory of Detonation. *Journal de Physique IV*. 1995, Colloque C4, supplément au Journal de Physique III, Volume 5, S. C4-3 - C4-21.

Davis, Wiliam C. 1998. Shock Waves, Rarefaction Waves, Equation of State. [Buchverf.] Jonas A. Zukas und William P. Walters. *Explosive Effects and Applications*. New York : Springer Science + Business Media, 1998, S. 82-96.

DeCarli, Paul S. und Meyers, Marc A. 1981. Design of uniaxial strain shock recovery experiments. [Buchverf.] Marc A. Meyers und Lawrence E. Murr. *Shock wave an high-strain rate phenomena in metals*. New York : Plenum Publishing Corperation, 1981, Bd. Chapter 22, S. 341-373.

Deribas, A.A. 2000. Acceleration of Metal Plates by a tangential Detonation wave. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2000, Vol. 41, No. 5, S. 824-829.

Dionne, Jean-Philippe. 1996. Chapman-Jouguet Properties of heterogeneous explosives. [Dissertation]. Montréal, Québec : McGill University, Department of Mechanical Engineering, 1996.

Fiederling, N. 1988. Emulsionssprengstoffe in Theorie und Praxis. *Nobel Hefte*. 1988, Bd. 54. Jg., Heft 4, S. 109-120.

Grady, Dennis. 2006. *Fragmentation of Rings and Shells*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2006.

Greulich, Stefan. 2004. Zur numerischen Simulation von Stahlbeton- und Faserbetonstrukturen unter Detonationsbeanspruchung. [Dissertation]. München : Universität der Bundeswehr, 2004.

Grosse Austing, Jan Bernhard. 2008. Sprengstoffe. [1.Staatsexamensarbeit]. Marburg : Philipps-Universität , 2008.

Gurney, Ronald W. 1943. The initial velocities of fragments from bombs, shell and grenades. *BRL Report No. 405*. Aberdeen Proving Ground, Maryland, USA : Ballistic Research Laboratories, 1943.

Handley, Caroline A. 2011. Numerical Modelling of two HMX-based plastic-bonded Explosives at the Mesoscale. [Dissertation]. St. Andrews, UK : University of St. Andrews, 2011.

Hill, L.G. und Catanach, R.A. 1998. W-76 PBX 9501 Cylinder Test. LA-13442-MS. Los Alamos, New Mexico, USA : Los Alamos National Laboratory, 1998.

Hoffmann, Kevin P. 2007. Bundesbehörde beweist. *Kurier ist der Knaller: Irische Künstlerin sprengte unser Blatt unter staatlicher Aufsicht in die Luft.* [Online] 13. 09. 2007. <http://www.berliner-kurier.de/archiv/kurier-ist-der-knaller-irische-kuenstlerin-sprengte-unser-blatt-unter-staatlicher-aufsicht-in-die-luft-bundesbehoerde-beweist,8259702,3973520.html>.

Hornberg, H. 1986. Determination of Fume State Parameters from Expansion Measurements of Metal Tube. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1986, 11, S. 23-31.

Hornberg, H. und Volk, F. 1989. The Cylinder Test in the Context of Physical Detonation Measurement Methods. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1989, 14, S. 199-211.

Jacobs, Sigmund J. 1980. Basic Equations for Shock and Detonation Waves. *Lectures in Detonation Physics*. 1980, Lecture #2, NSWC MP 81-399, S. 19-52.

—. **1974.** The Gurney formula: Variations of a theme by Lagrange. *NOLTR* 74-86. White Oak, Silver Spring, MD, USA : Naval Ordnance Laboratory, 1974.

Johnsten, Ian A. 2005. The Nobel-Abel Equation of State: Thermodynamic Derivations for Ballistic Modelling. Edinburgh, Australia : Defence Science and Technology Organisation, 2005.

Kennedy, J.E. 1998. The Gurney Model of Explosive Output for Driving Metal. [Buchverf.] J.A. Zukas und W.P. Walters. *Explosive Effects and Applications*. New York : Springer Science + Business Media, 1998, S. 115-135.

Keshavarz, Mohammad Hossein. 2008. New Method for Prediction of the Gurney Energy of High Explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2008, 33 (4), S. 316-320.

Klapötke, Thomas. 2009. *Chemie der hochenergetischen Materialien*. Berlin : Walter de Gruyter GmbH & Co.KG, 2009.

Koch, A., Arnold, N. und Estermann, M. 2002. A Simple Relation between the Detonation Velocity of an Explosive and its Gurney Energy. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2002, 27, S. 365-368.

Köhler, Josef und Meyer, Rudolf. 1998. *Explosivstoffe*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH, 1998. Bd. 9. überarbeitete und erweiterte Auflage.

Krebs, H. und Ohser, J. 1986. Berechnung der Detonations- und Explosionsparameter von Sprengstoffen. *Sprengstoffe Pyrotechnik*. 1986, 3/4, 23, S. 1-32.

Kuhl, A.L. 2010. Thermodynamic States in Explosion Fields. *LLNL-CONF-425882*. Coeur d'Alene, Ohio : Lawrence Livermore National Laboratory, 2010.

Kury, J.W., Lee, E.L. und Hornig, H.C. 1968. Adiabatic expansion of high explosive detonation products. *UCRL-50422*. Livermore, USA : Lawrence Radiation Laboratory, 1968.

Lan, I-Feng, et al. 1993. An Improved Simple Method of Deducing JWL Parameters from Cylinder Expansion Test. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1993, 18.

Lee, E., Finger, M. und Collins, W. 1973. JWL Equation of state coefficients of high explosives. *UCID- 16189*. Livermore, CA, USA : Lawrence Livermore Laboratory, 1973.

Lee, Peter R. 1998. Theories and Techniques of Initiation. [Buchverf.] Jonas A. Zukas und William P. Walters. *Explosive Effects and Applications*. New York : Springer Science + Business Media, 1998, S. 189-200.

Lindsay, C.M., et al. 2010. Increasing the Utility of Copper Cylinder Expansion Test. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2010, 35, S. 433-439.

Miller, P. M. und Alexander, K. E. 1989. Determining JWL equation of state parameters using the Gurney equation approximation. *9th International Symposium on Detonation*. Silver Spring, Maryland, USA : Naval Surface Warfare Center, White Oak Laboratory, 1989. S. 498-505.

Mott, N.F. 1943. A theory of the fragmentation of shells and bombs (A.C. 4035). [Buchverf.] Dennis Grady. *Fragmentation of Rings and Shells*. Heidelberg : Springer-Verlag, 1943.

—. **1947.** Fragmentation of shell cases. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1947, Vol. 189, No. 1018, S. 300-308.

Nagayama, Kunihiro und Kubota, Shiro. 2003. Equation of state for detonation product gases. *Journal of applied physics*. 2003, Volume 95, Number 5, S. 2583-2589.

Nolde, Moana. 2010. Explosionsdruckbelastung von sicherheitsrelevanten Gebäudestrukturen. *12. Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik*. [Vortrag]. Berlin : BAM, 2010. S. 23-25.

—. **2008.** Numerische Simulationen von Detonationen. [Vortrag]. Berlin : BAM, 2008.

—. **2009.** Numerische Simulationen von Detonationswirkungen. [Vortrag]. Wildau : TFH Wildau, 2009.

Ouchterlony, F., et al. 2003. Charakterisierung der Leistungsfähigkeit von ANFO- und Emulsionssprengstoffen mit Hilfe von großen Zylinderexpansionsversuchen. *BHM*. 2003, Bd. 148. Jg., Heft 6, S. 231-238.

Ouchterlony, F., et al. 2005. Determination of the energetic characteristics of commercial explosives using the cylinder expansion test technique. *Swebrec-Report 2005:1*. Luleå : Luleå University of technology, 2005.

Polk, J.F. 1984. Determination of the Equation of State of Explosive Detonation Products from the Cylinder Expansion Test. *Technical Report*

ARBRL-TR-02571. Aberdeen, Maryland, USA : Ballistic Research Laboratory, 1984.

Reaugh, J.E. und Souers, P.C. 2004. A Constant-Density Gurney Approach to the Cylinder Test. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2004, 29/ 2, S. 124-128.

Roth, J. 1983. Velocity of Explosively Driven Fragments. [Buchverf.] Seymour M. Kaye und Henry L. Herman. *Encyclopedia of Explosives and Related Items, PATR 2700, Volume 10*. Dover, New Jersey, USA : US ARMY Armament Research and Development Command, 1983, S. V63-V94.

Schall, R. 1989. On the Hydrodynamic Theory of Detonation. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1989, 14, S. 133-139.

Schlotauer, T. und Heide, G. 2011. Schockwellensynthese an der TU Bergakademie Freiberg. 6. *Informationsveranstaltung Sprengstoffe und Pyrotechnik*. [Vortrag]. Berlin : BAM, 2011.

Schlotauer, Thomas. 2012. Aufbau und Entwicklung des Freiburger Schockwellensyntheselabors. [Dissertationsentwurf]. Freiberg : Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2012.

Souers, P. C., Wu, B. und Haselman, L. C. 1995. Detonation Equation of State at LLNL. *UCRL-ID-119262 Rev.3*. Livermor, CA 94566, USA : Energetic Materials Center Lawrence Livermor National Laboratory, 1995.

Sours, P. C., et al. 2001. Detonation Energies from the Cylinder Test and CHEETAH V3.0. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2001, 26.

Spyra, Wolfgang und Volk, Martin. 1991. A new Method of Deactivation of Bombs by the Low-Order Blasting Technique. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1991, 16, S. 305-308.

Tahar, M. Ait und Stollenwerk, J. Einführung in die Fehlerrechnung. [Physikalisches Praktikum]. Köln : FH Köln, Institut für Physik.

Zweite Verordnung zum Sprengstoffgesetz (2.SprengV), neugefasst durch Bek. v. 10.9.2002 I 3543; zuletzt geändert durch Art. 2 V v. 26.11.2010 I 1643

Anlage 2 der Unfallverhütungsvorschrift BGV B5 (bisherige VBG 55a) - Explosivstoffe - Allgemeine Vorschrift vom 1. April 1995, in der Fassung vom 1. April 2001

9. Anhang

9.1. Versuchsübersicht

Die nachstehende Tabelle I.1 gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche. Aufgelistet sind die jeweiligen Massen der Kupferrohre (M) und der Sprengstoffe (C) sowie deren Verhältnis (M/C), die Sprengstoffdichte ρ_{Ex} , die Detonationsgeschwindigkeit D sowie der Abstand zwischen Zylinderrohr und Kamera. Um einen besseren Überblick zu erhalten, erfolgte die Sortierung nach Art des Sprengstoffes.

Tabelle 9.1: Überblick über die durchgeführten Zylindertestversuche, nach Sprengstoffen sortiert

Versuch Nr.	Sprengstoff	M_M [g]	M_C [g]	M_M / M_C [-]	ρ_o [g/cm ³]	v_D [m/s]	Abstand [m]
1	Andex	3160.0	584.3	5.408	0.930	4325	17
2	Andex	3159.1	571.2	5.531	0.909	4325	60
3	Andex	3159.4	568.9	5.554	0.905	4325	60
4	Andex	3159.0	561.9	5.622	0.894	4460	60
5	Andex	3157.9	568.8	5.552	0.905	4630	60
6	Andex	3144.8	570.6	5.511	0.908	4067	60
7	Andex	3145.5	569.4	5.524	0.906	4300	60
8	Andex	3145.3	575.1	5.469	0.915	4108	60
9	Andex	3148.2	574.2	5.483	0.914	4586	60
32	Andex	3163.2	558.9	5.660	0.890	4125	60
61	Andex	3167.1	577.6	5.483	0.919	3217	17
64	Andex	3151.2	567.1	5.557	0.903	4157	17
71	Andex	3168.7	565.7	5.601	0.900	3170	17
72	Andex	3169.7	574.2	5.520	0.914	2982	17
73	Andex	3168.9	571.8	5.542	0.910	2992	17
10	Wetter-Westfalit C	3146.9	601.8	5.229	0.958	2426	60
11	Wetter-Westfalit C	3145.2	631.0	4.984	1.004	2159	60
12	Wetter-Westfalit C	3146.1	620.2	5.073	0.987	2684	60
13	Wetter-Westfalit C	3145.7	612.1	5.139	0.974	2241	60
14	Wetter-Westfalit C	3146.3	637.1	4.938	1.014	2193	60

Versuch Nr.	Sprengstoff	m_M [g]	m_C [g]	m_M / m_C [-]	ρ_{Ex} [g/cm ³]	v_D [m/s]	Abstand [m]
15	Emulgit 42G	3165.1	793.6	3.988	1.263	4005	60
16	Emulgit 42G	3169.1	740.1	4.282	1.178	4137	60
17	Emulgit 42G	3159.5	780.8	4.046	1.243	3984	60
18	Emulgit 42G	3165.1	785.3	4.030	1.250	4240	60
19	Emulgit 42G	3164.5	765.7	4.133	1.219	4272	60
20	Emulgit 42G	3164.5	778.7	4.064	1.239	4184	60
31	Emulgit 42G	3164.5	785.7	4.028	1.250	4137	60
21	Emu I	3165.1	642.6	4.925	1.023	4107	60
22	Emu II	3168.3	665.4	4.761	1.059	4483	60
23	Emu III	3165.5	661.2	4.788	1.052	4060	60
24	Emu IV	3161.4	709.2	4.458	1.129	4787	60
25	Emu V	3166.0	718.4	4.407	1.143	4631	60
26	Emu VI	3166.0	727.0	4.355	1.157	4738	60
27	Emu VII	3166.9	734.8	4.310	1.169	4870	60
28	Emu VIII	3165.7	734.7	4.309	1.169	4730	60
29	Emu IX	3168.9	738.5	4.291	1.175	4438	60
30	Emu X	3165.5	739.5	4.281	1.177	4447	60
34	Emu XI	3163.5	729.5	4.337	1.161	4863	60
37	Emu XII	3183.0	709.4	4.487	1.129	5197	60
38	Emu XIII	3180.3	849.2	3.745	1.352	1441	60
40	Emu XIV	3162.5	596.4	5.303	0.949	3630	60
41	Emu XV	3163.4	642.9	4.921	1.023	4404	60
42	Emu XVI	3181.8	729.2	4.363	1.161	4290	60
43	Emu XVII	3181.5	727.8	4.371	1.158	5305	60
44	Emu XVIII	3164.4	634.2	4.990	1.009	4798	60
45	Emu XIX	3167.2	760.2	4.166	1.210	4054	60
46	Emu XX	3181.9	604.5	5.264	0.962	3686	60
47	Emu XXI	3163.6	752.3	4.205	1.197	4621	60
48	Emu XXII	3182.0	630.7	5.045	1.004	3877	60
63	Emu XXVIII	3159.2	670.1	4.714	1.066	---	17
65	Emu XXXa	3168.1	627.3	5.050	0.998	4308	17
66	Emu XXXb	3167.8	626.4	5.057	0.997	4059	17
67	Emu XXXIa	3169.1	664.9	4.766	1.058	4266	17
75	Emu XXXIb	3168.5	754.5	4.199	1.201	4168	17
76	Emu XXXIIa	3168.4	706.3	4.486	1.124	5724	17
77	Emu XXXIIb	3167.7	753.9	4.202	1.200	4751	17

Versuch Nr.	Sprengstoff	m_M [g]	m_C [g]	m_M / m_C [-]	ρ_{Ex} [g/cm ³]	v_D [m/s]	Abstand [m]
78	Emu XXXIIIa	3166.7	601.1	5.268	0.957	3434	17
79	Emu XXXIIIb	3167.9	674.9	4.694	1.074	4521	17
80	Emu XXXIVa	3169.6	694.7	4.563	1.106	5353	17
81	Emu XXXIVb	3169.1	651.9	4.861	1.038	5437	17
49	Dumbo 01 (XXIII)	3174.4	753.1	4.215	1.199	6317	60
50	Dumbo 02 (XXIV)	3180.2	728.8	4.364	1.160	6649	60
54	Dumbo 03 (XXV)	3167.4	714.4	4.434	1.137	5633	60
55	Dumbo 04 (XXVIa)	3170.8	727.0	4.361	1.157	5630	60
56	Dumbo 05 (XXVIb)	3182.4	734.2	4.335	1.169	4370	60
58	Dumbo 06 (XXVIIa)	3180.9	721.2	4.411	1.148	5753	60
59	Dumbo 07 (XXVIIb)	3159.6	726.8	4.347	1.157	5630	60
33	TNT	3168.9	462.0	6.859	0.735	4946	60
35	TNT	3162.8	527.3	5.998	0.839	4980	60
36	TNT	3166.7	499.0	6.346	0.794	4848	60
39	TNT	3167.3	496.9	6.374	0.791	4982	60
51	Supergel 30	3163.9	927.5	3.411	1.476	5757	60
52	Supergel 30	3164.7	947.7	3.339	1.508	6654	60
53	Supergel 30	3164.0	954.3	3.316	1.519	5655	60
57	Supergel 30	3163.8	927.2	3.412	1.476	5833	60
60	Supergel 30	3164.8	969.2	3.265	1.543	5882	60
62	Supergel 30	3164.0	974.6	3.246	1.551	5743	17
74	Supergel 30	3169.9	917.5	3.455	1.460	5342	17
82	Supergel 30	3169.0	971.4	3.262	1.546	5558	17
83	Supergel 30	3168.5	957.2	3.310	1.523	5265	17
68	hexogenh. Ladung	3854.0	1731.1	2.226	1.763	5393	17
69	hexogenh. Ladung	3854.0	1732.1	2.225	1.764	5393	17
70	hexogenh. Ladung	3853.5	1724.7	2.234	1.757	5393	17

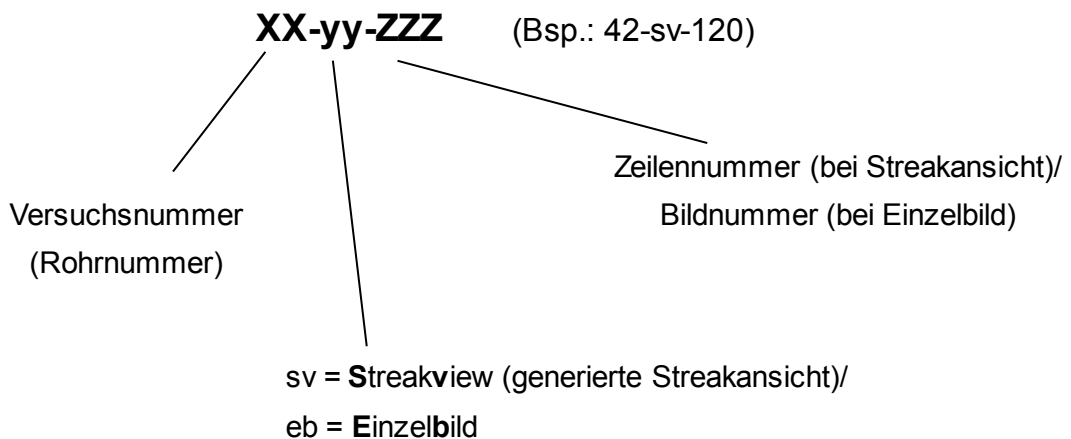
9.2. Radiale Ausdehnung

Nachfolgend sind die Weg-Zeit-Kurven der einzelnen Versuche nach Sprengstoffen sortiert dargestellt. Die aufgezeichneten radialen Ausdehnungen wurden mit der Ausgleichsfunktion

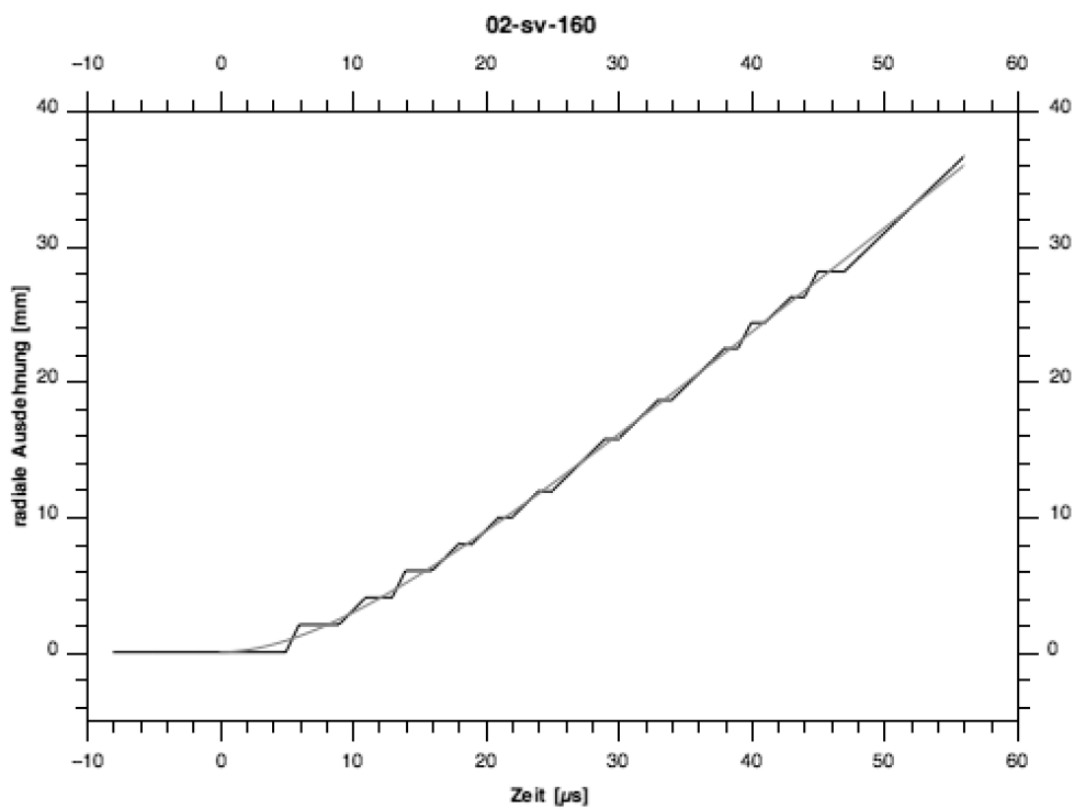
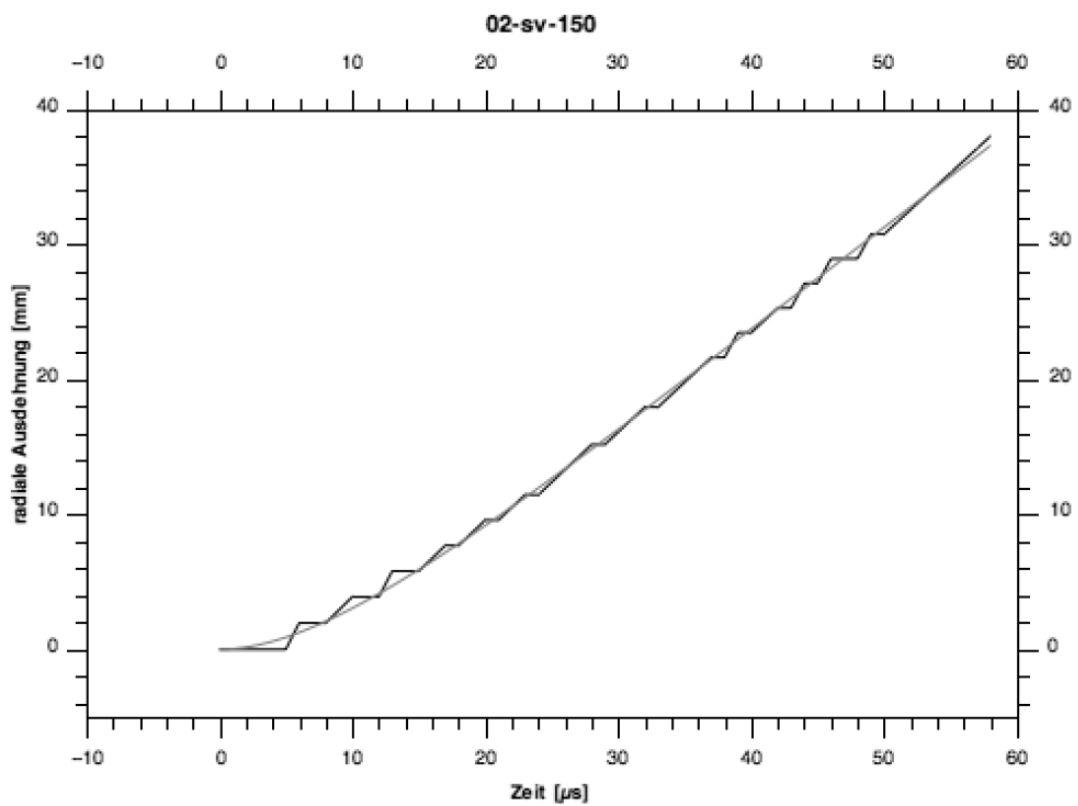
$$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right) \quad 2.4.4$$

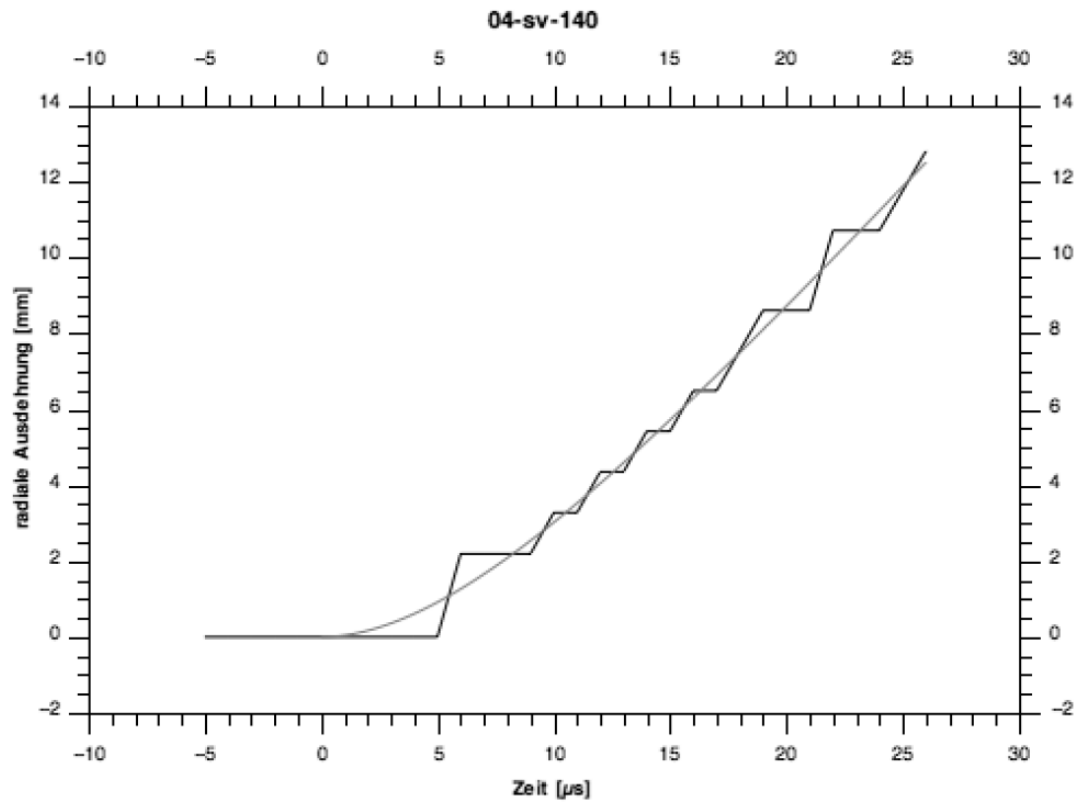
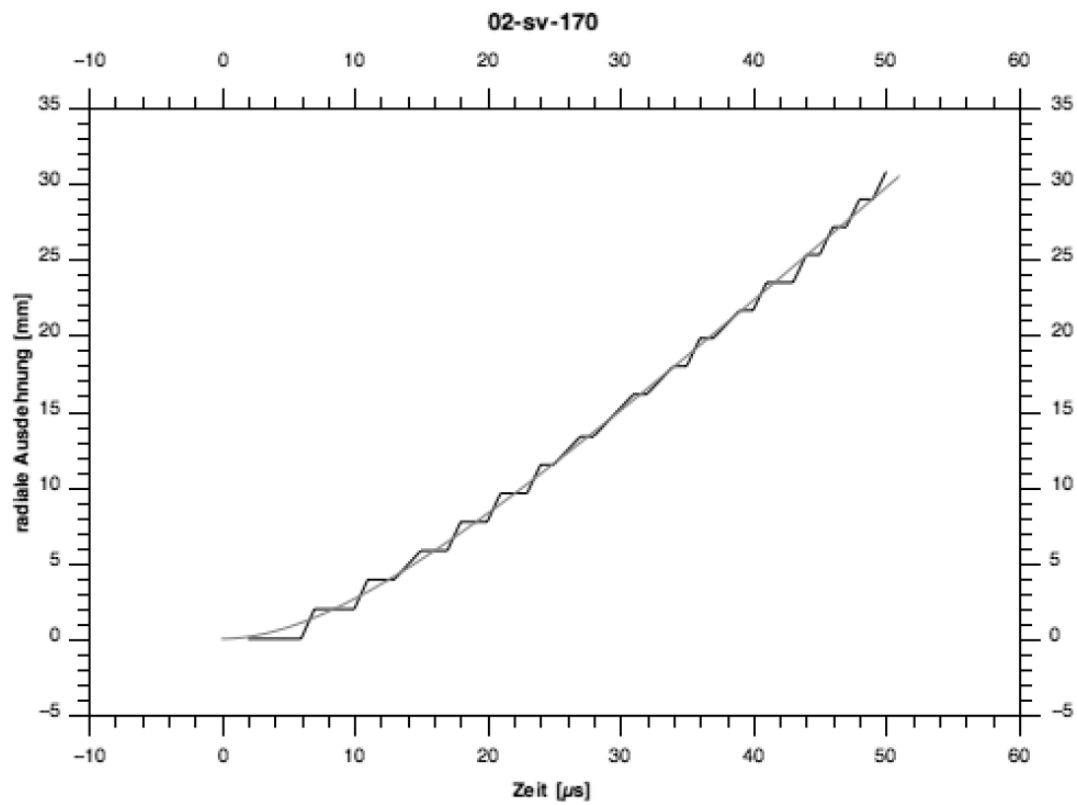
gefittet. Die Ausgleichskurven sind ebenfalls in den Diagrammen dargestellt. Die ermittelten Werte der Kurvenanpassungsparameter A_r und B_r sind in den den jeweiligen Sprengstoffen anschließenden Tabellen aufgeführt.

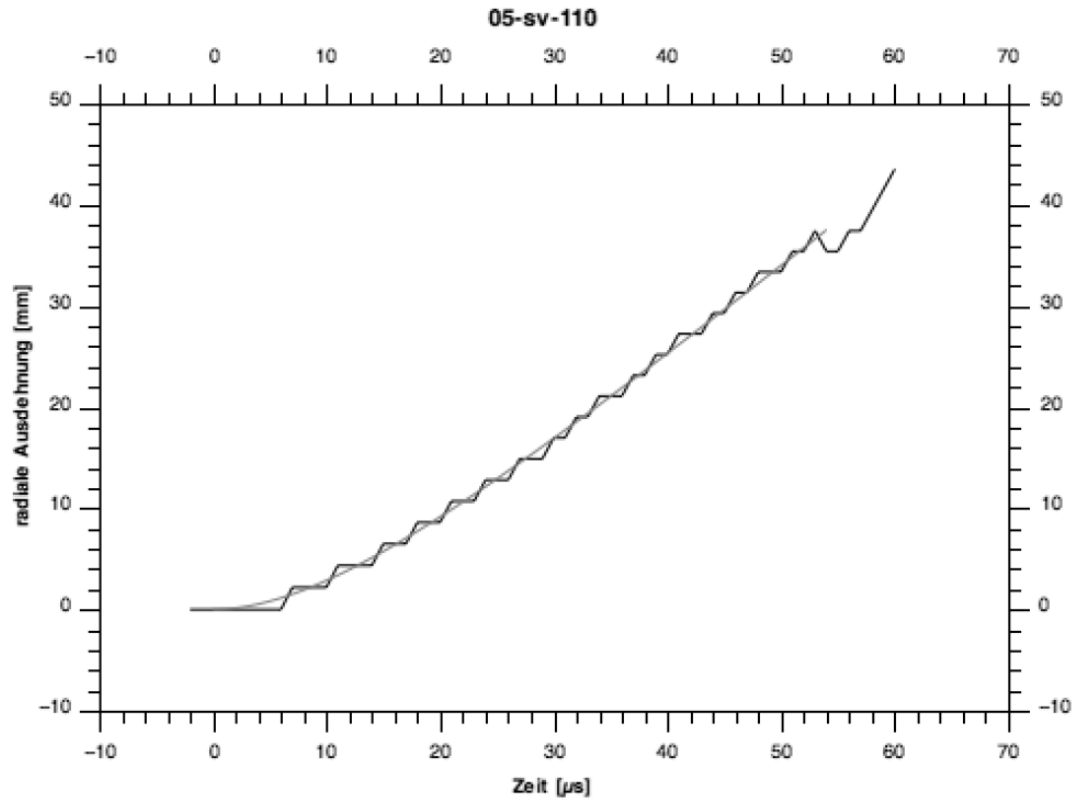
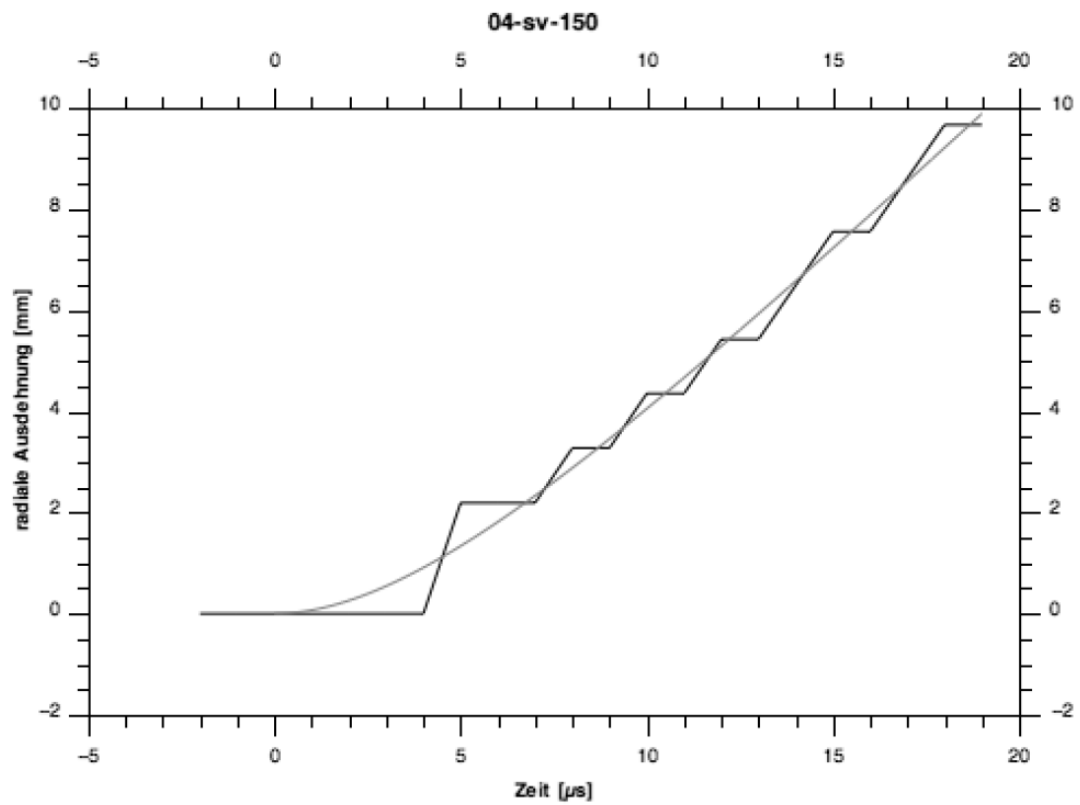
Die Dateinamen besitzen folgende Bedeutung:

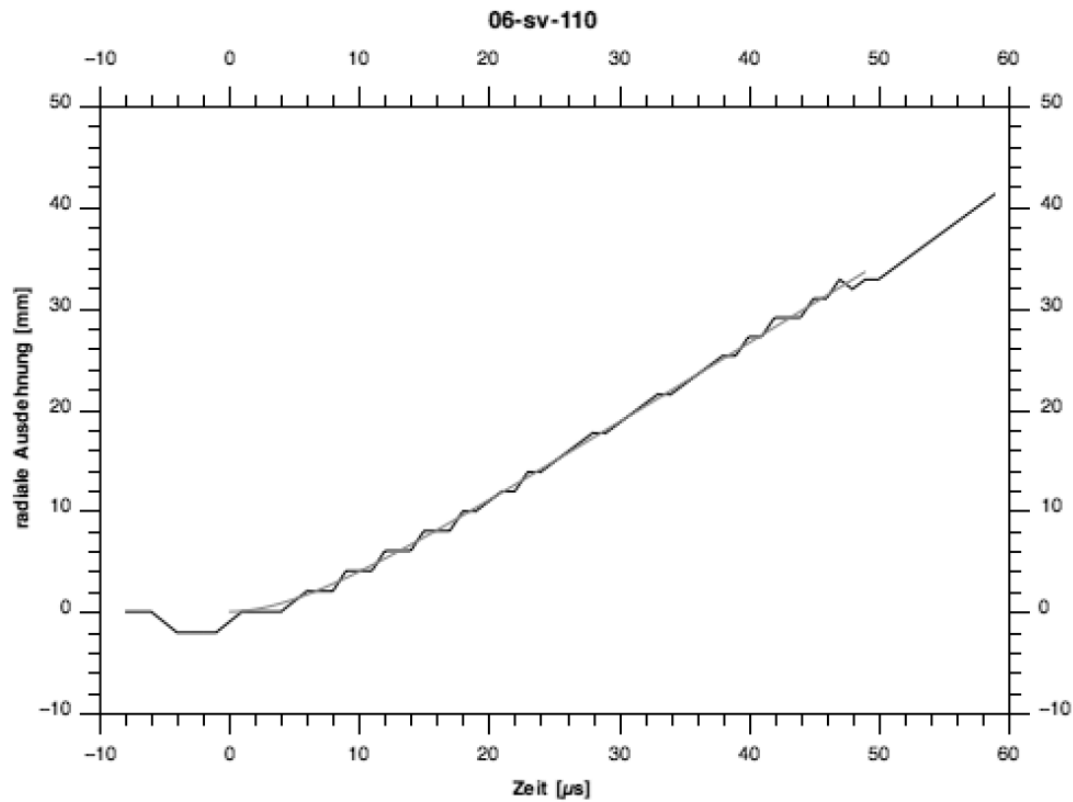
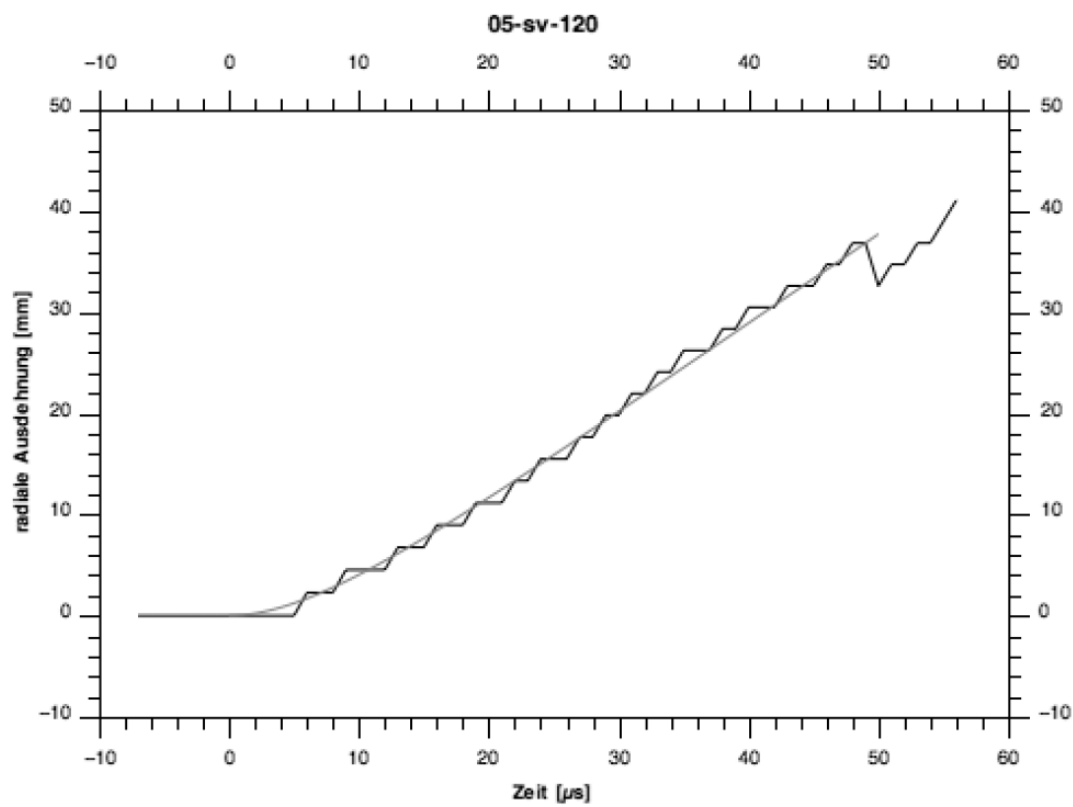


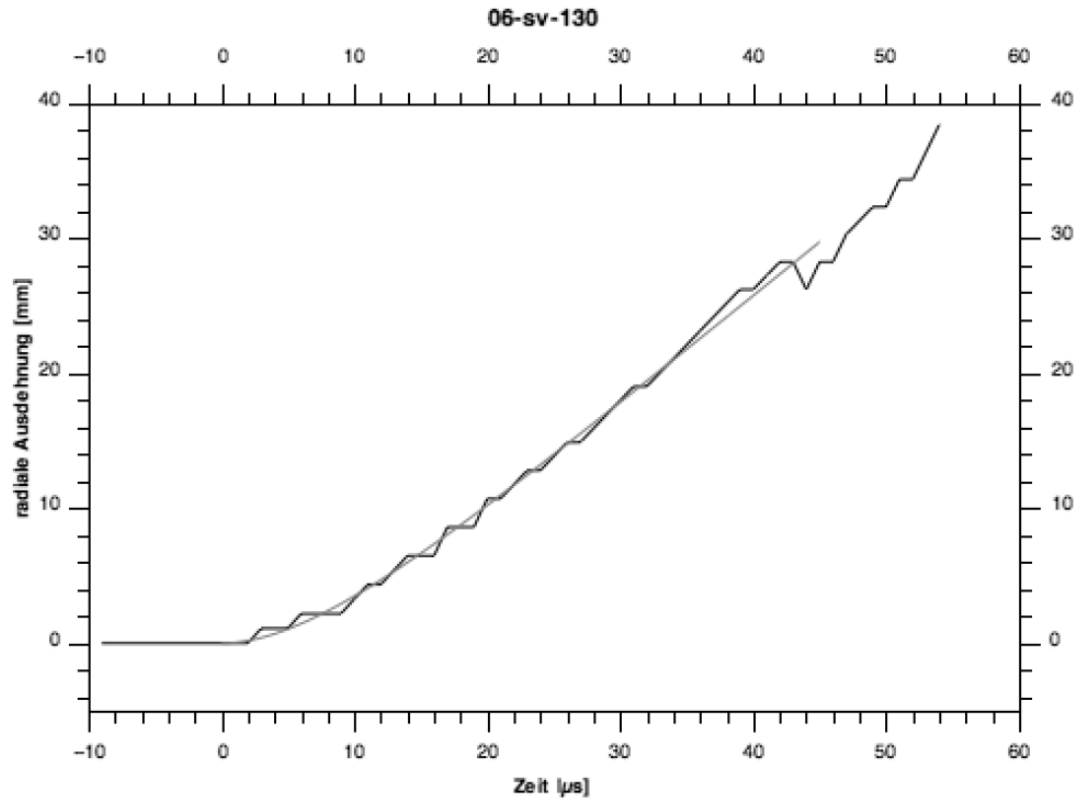
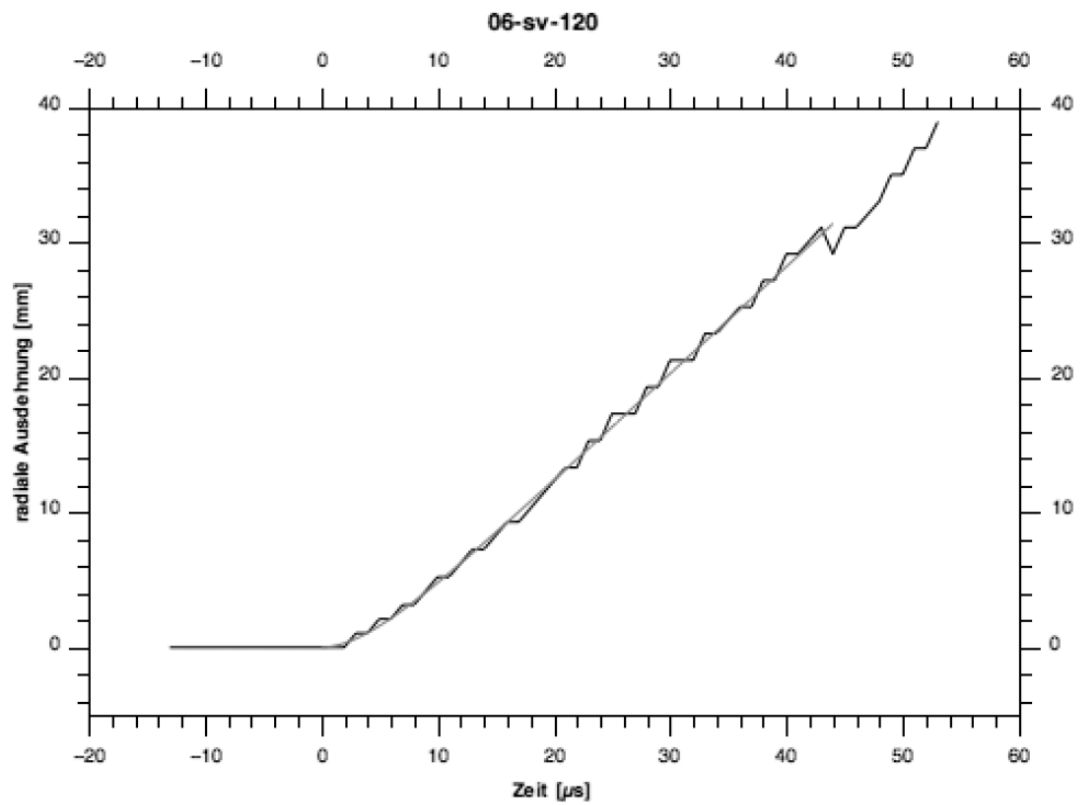
9.2.1. "Andex", Eurodyn Sprengmittel GmbH

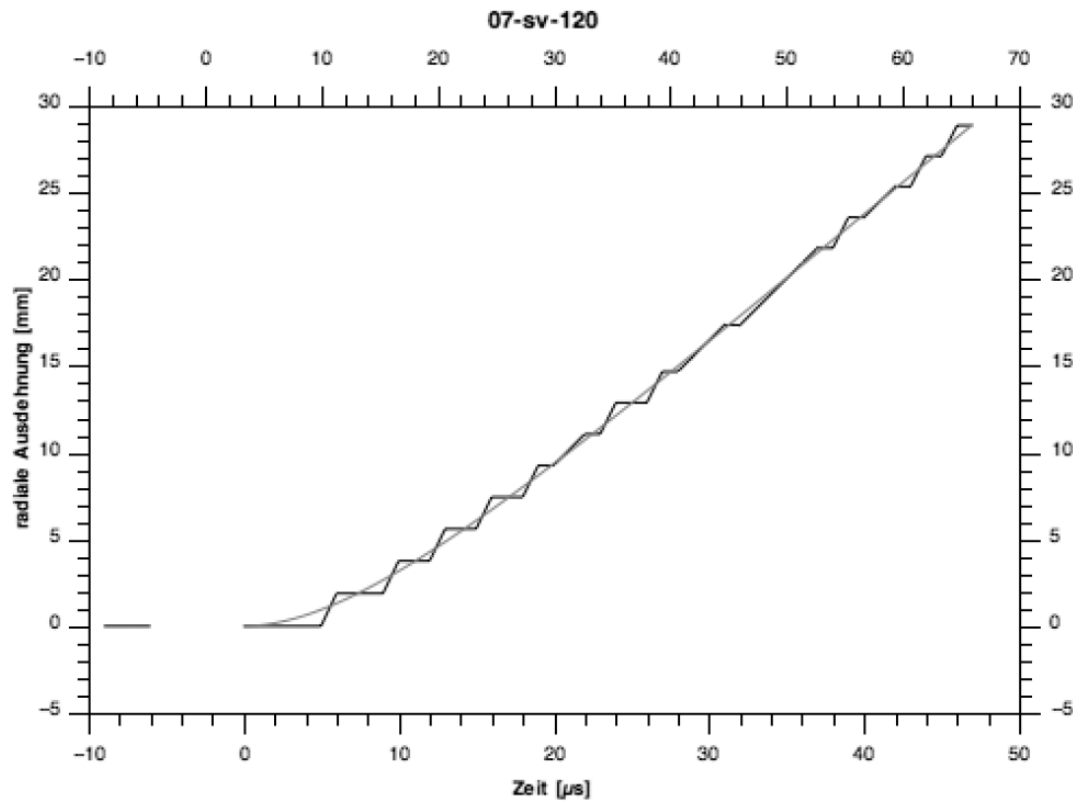
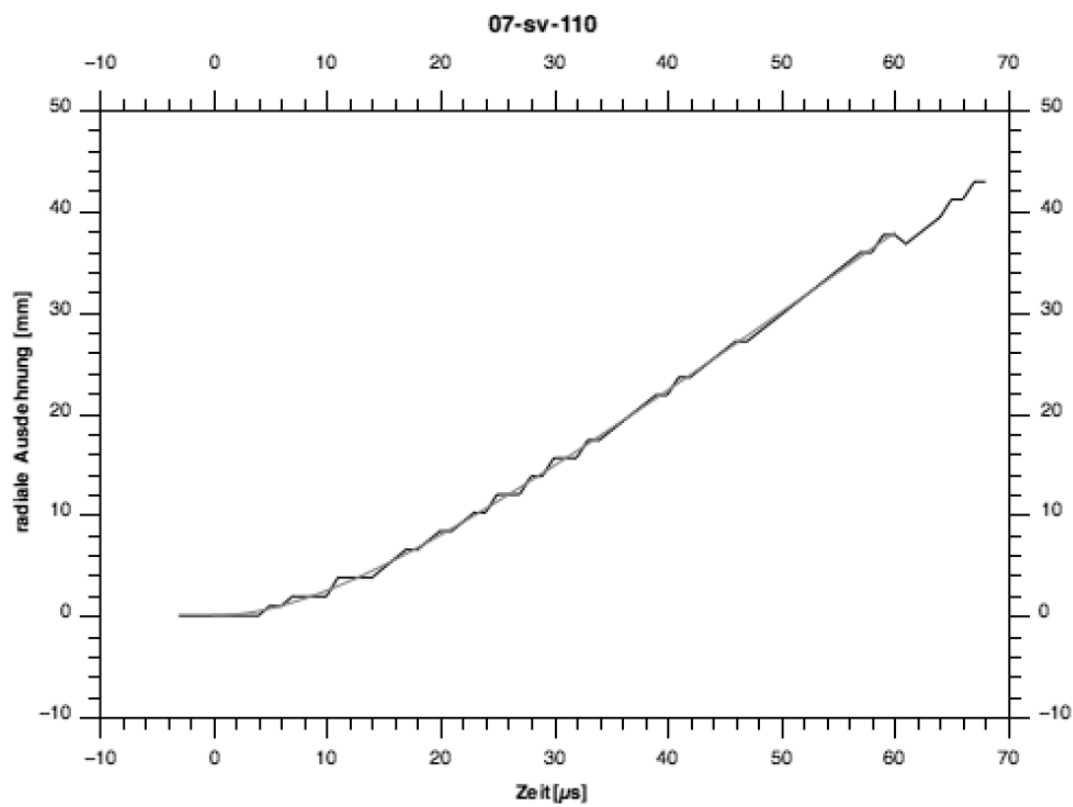


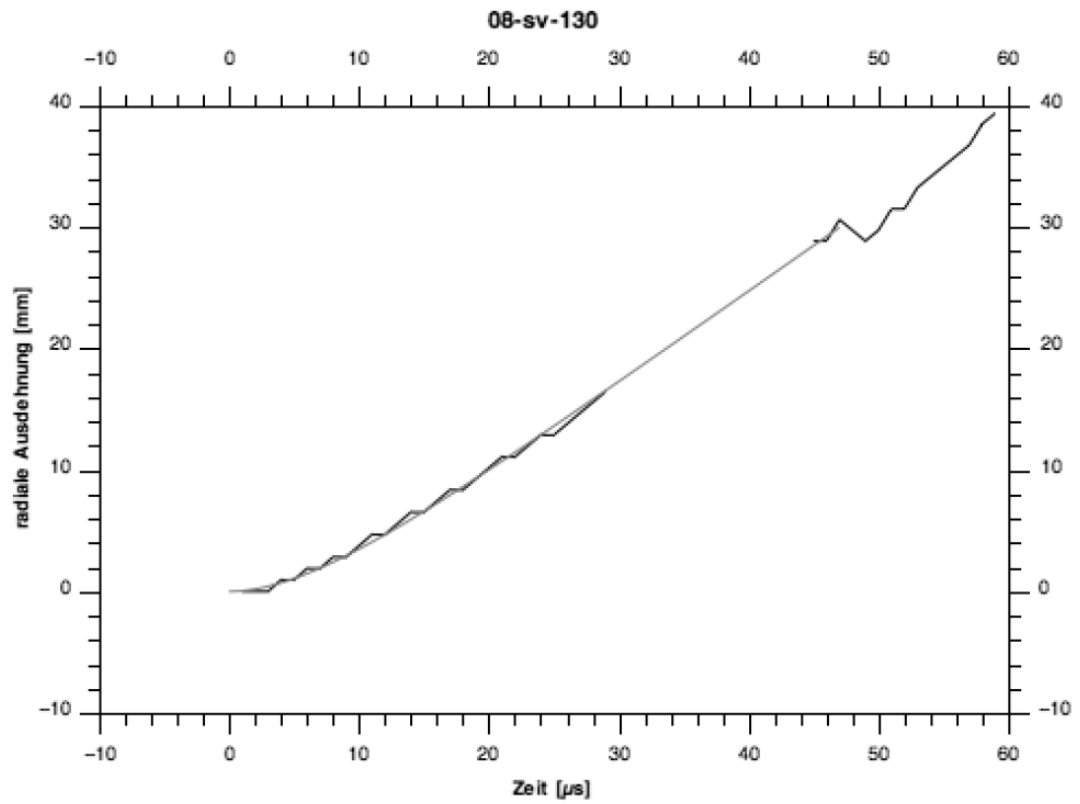
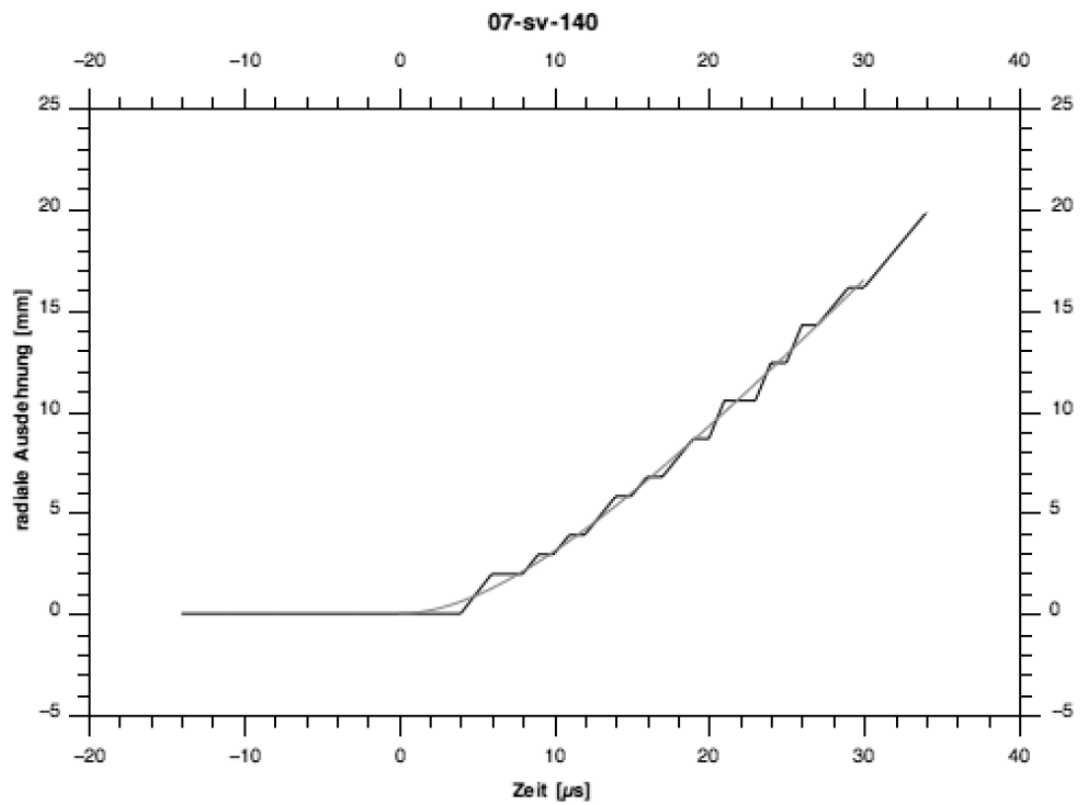


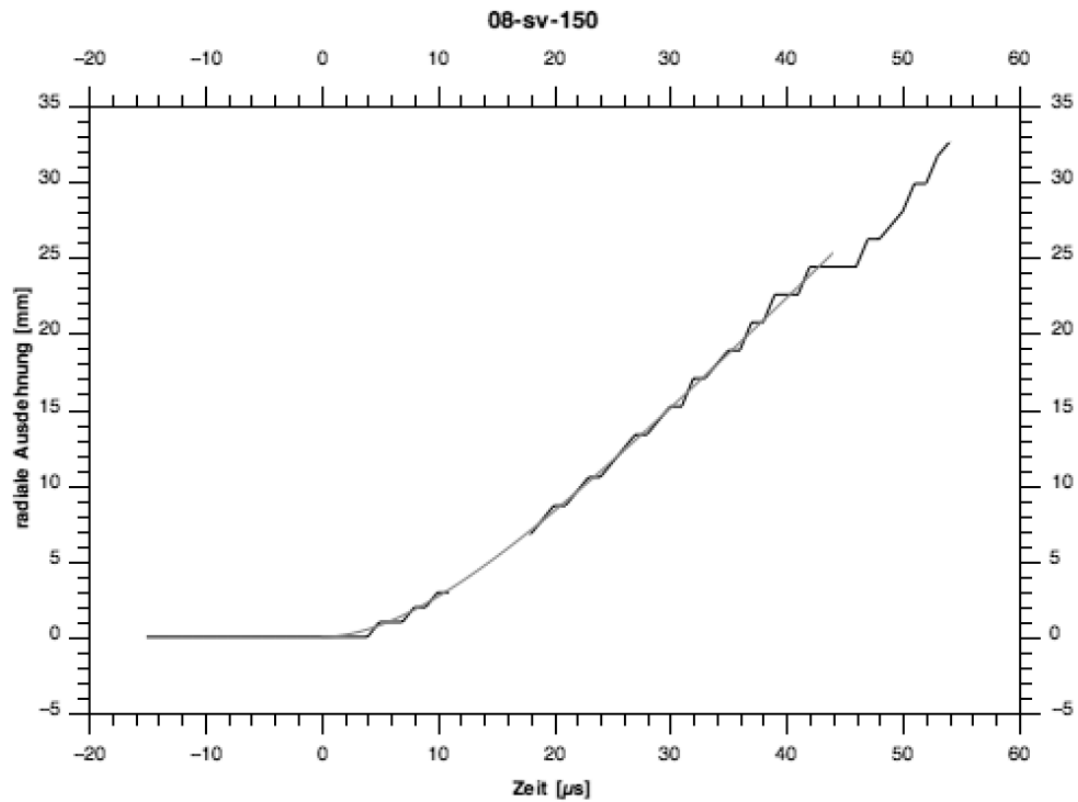
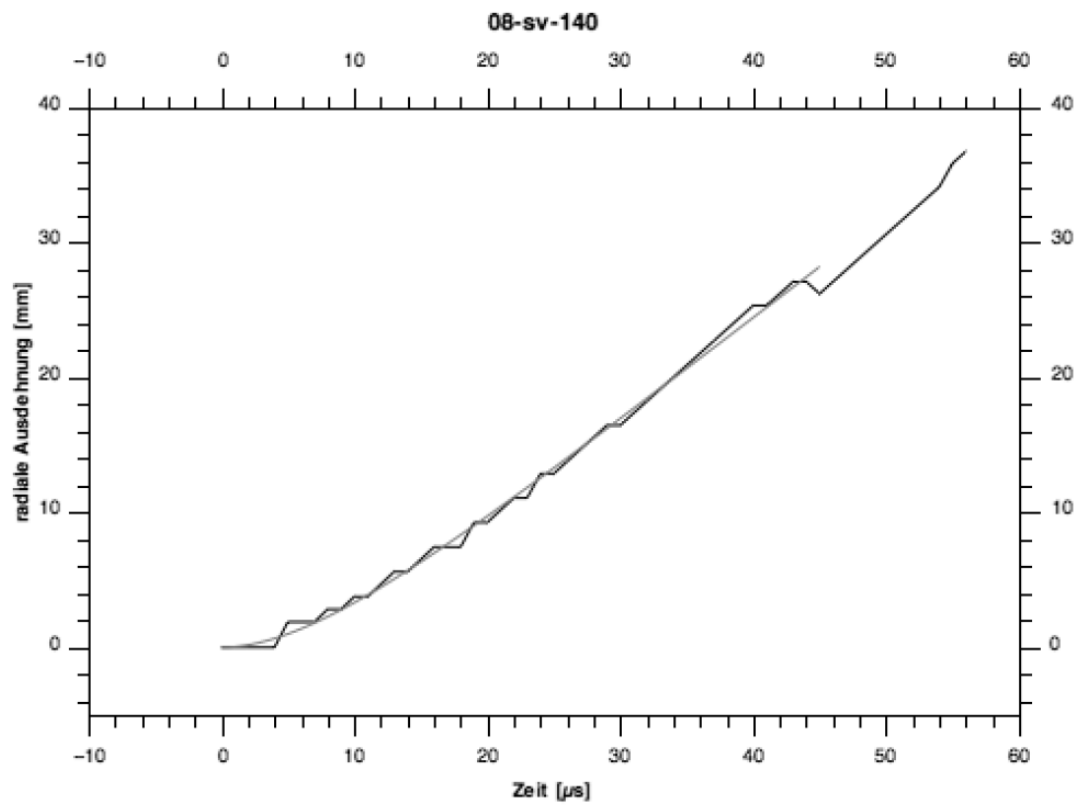


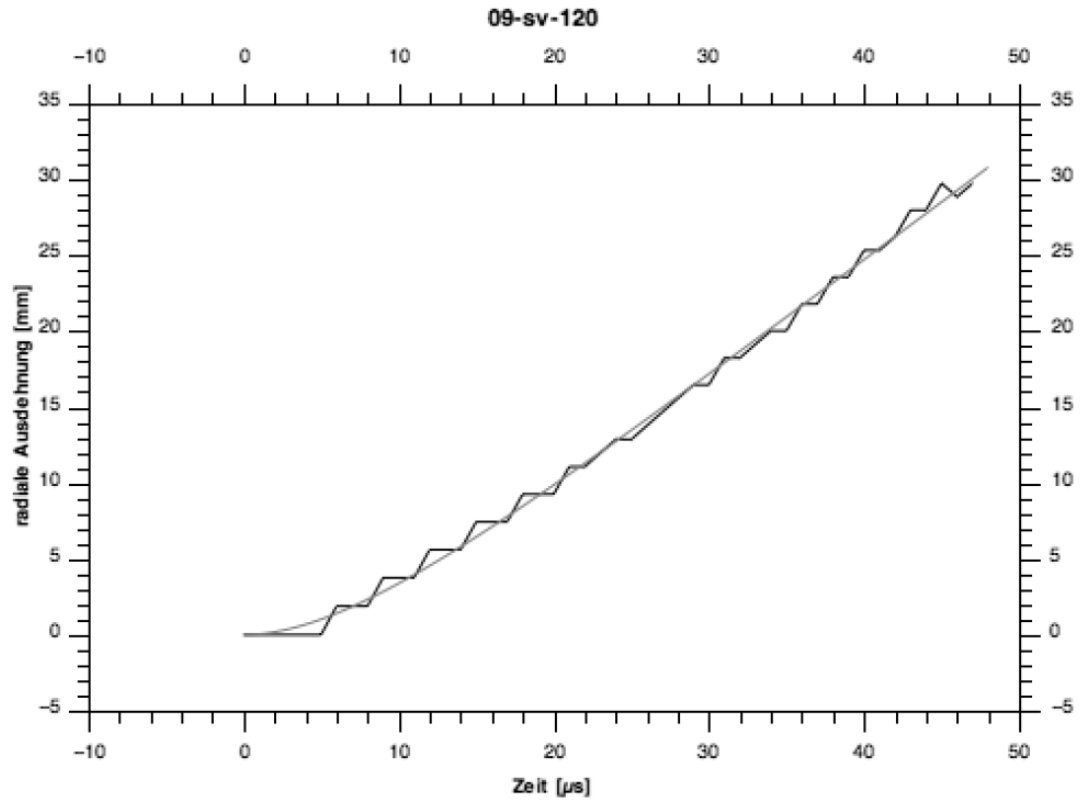
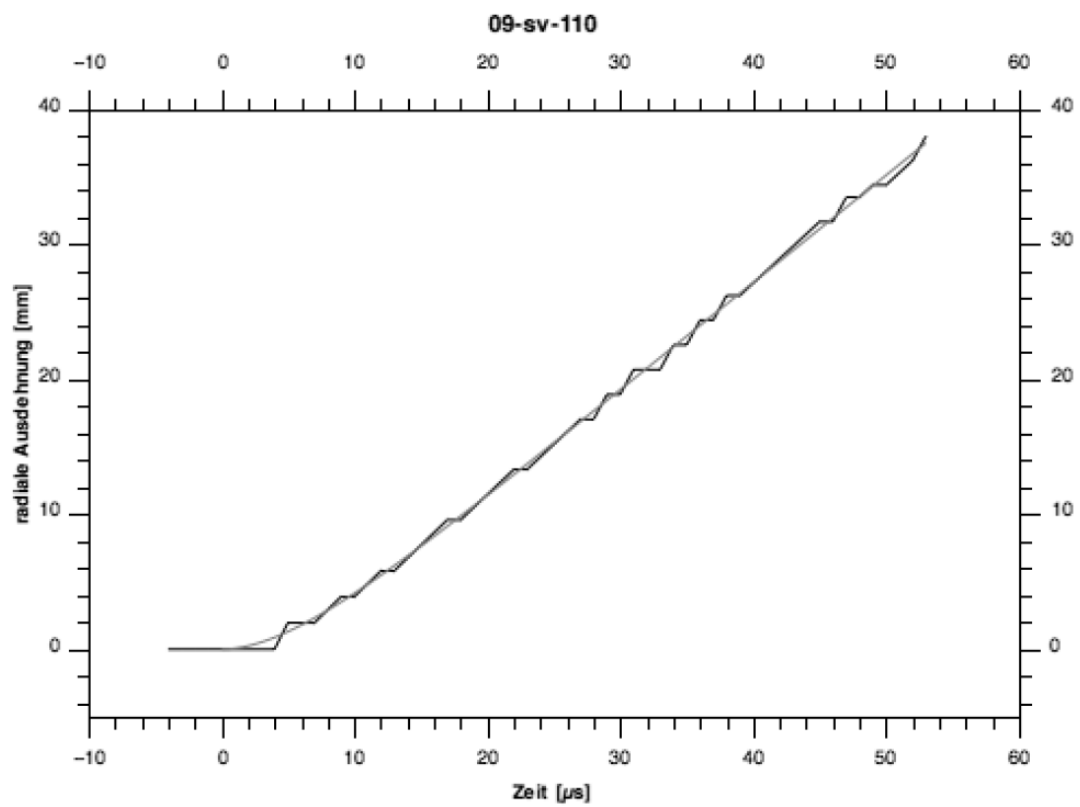


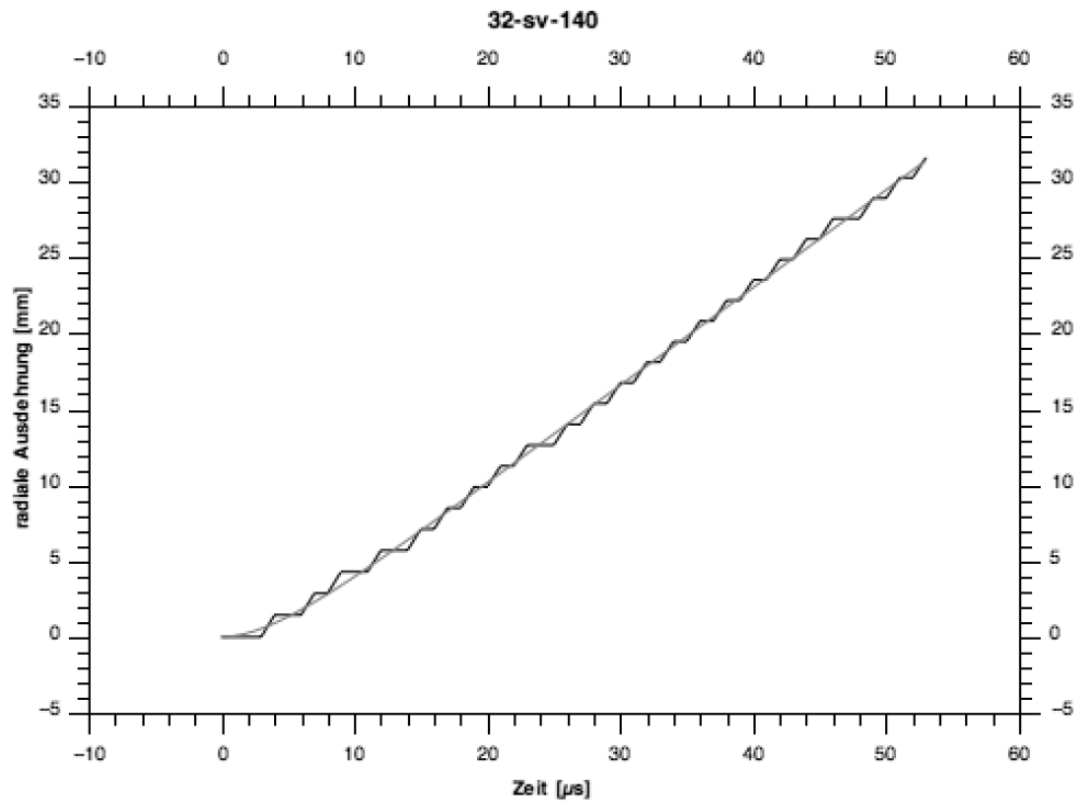
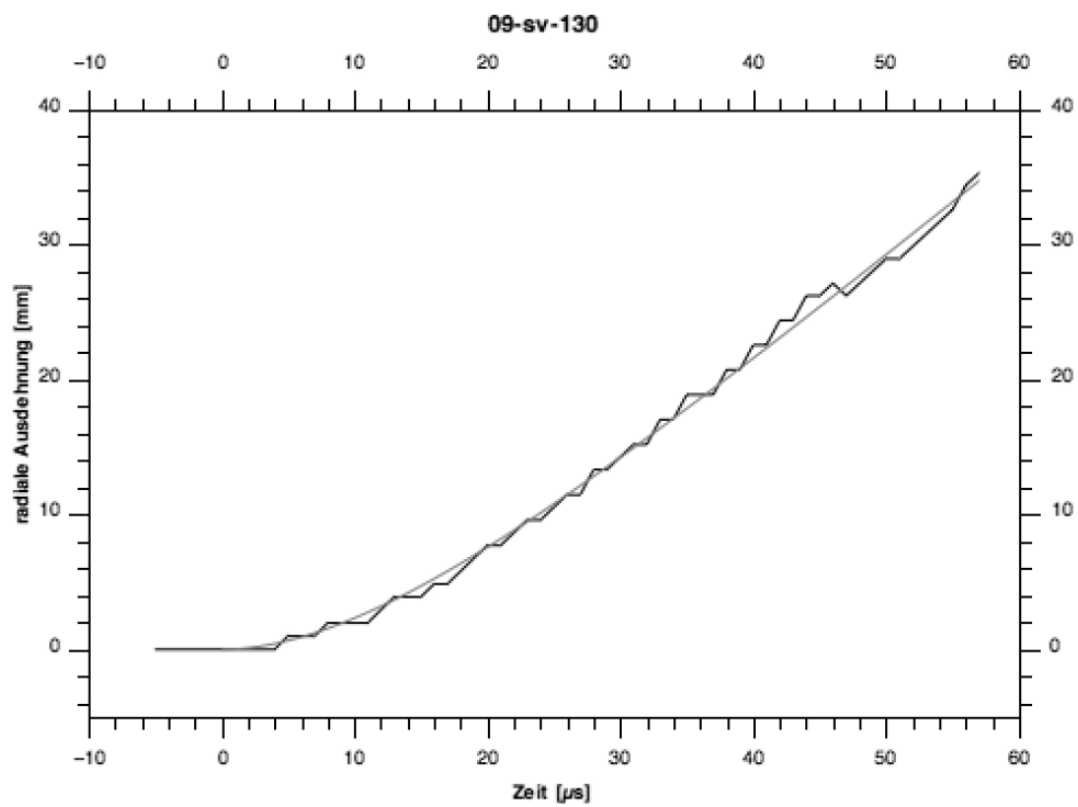


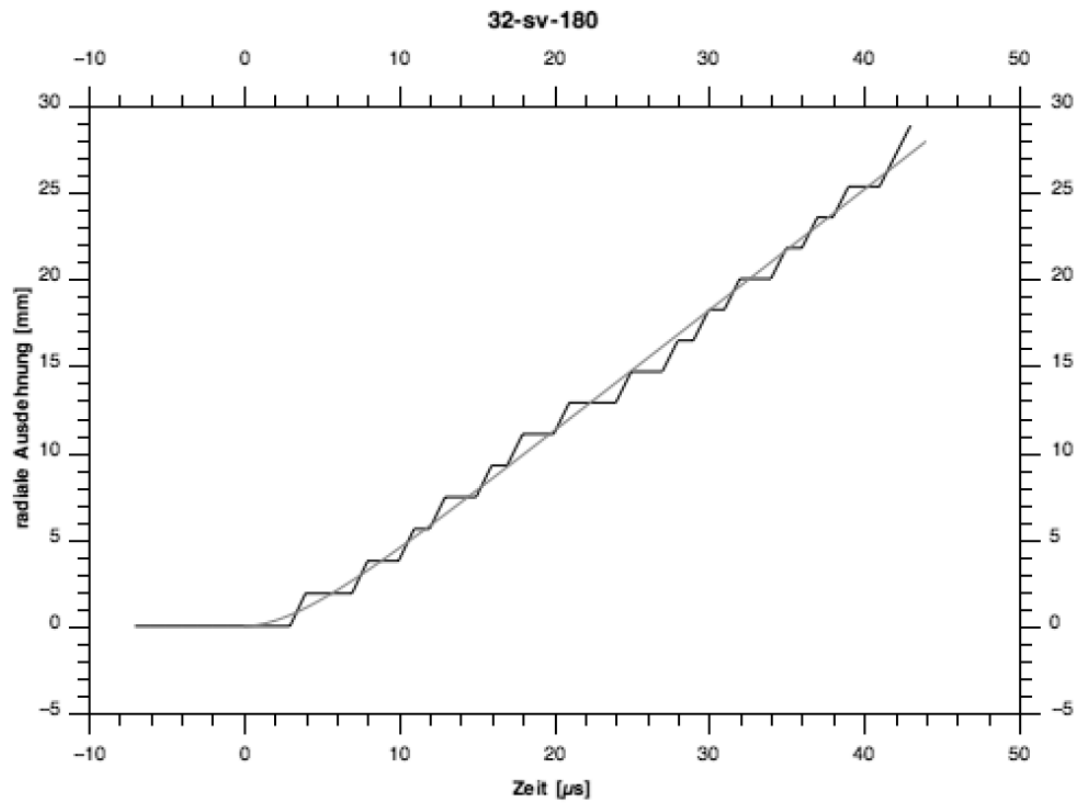
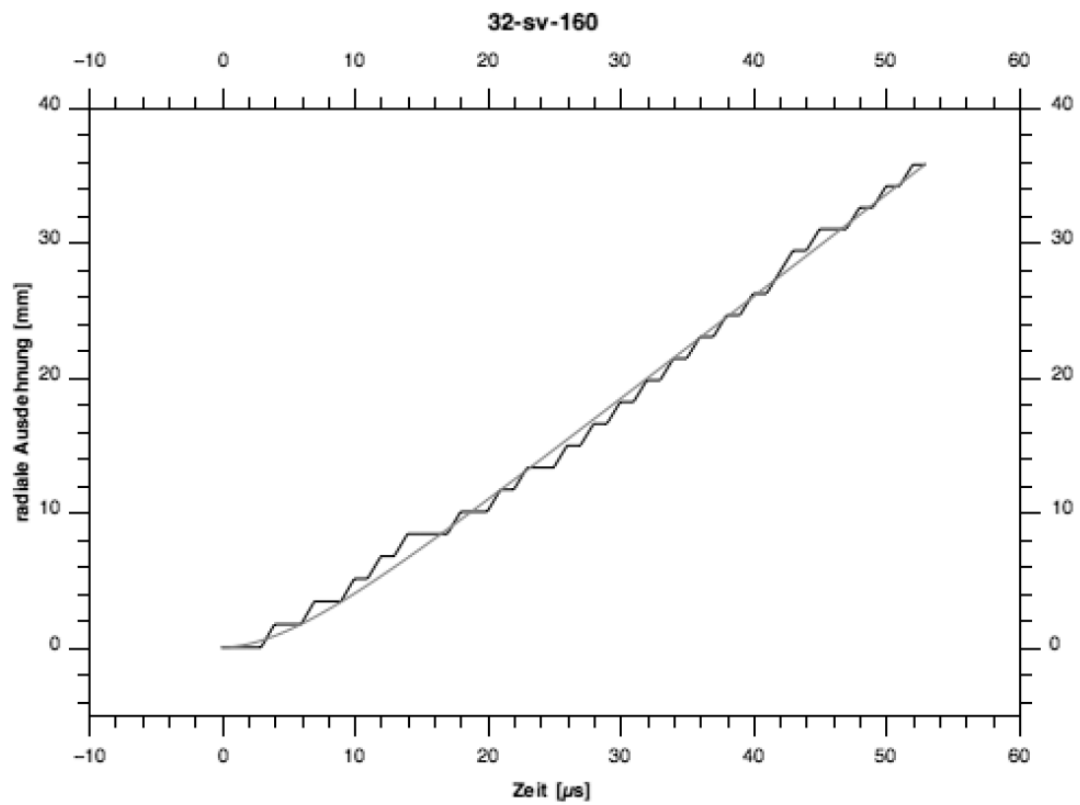


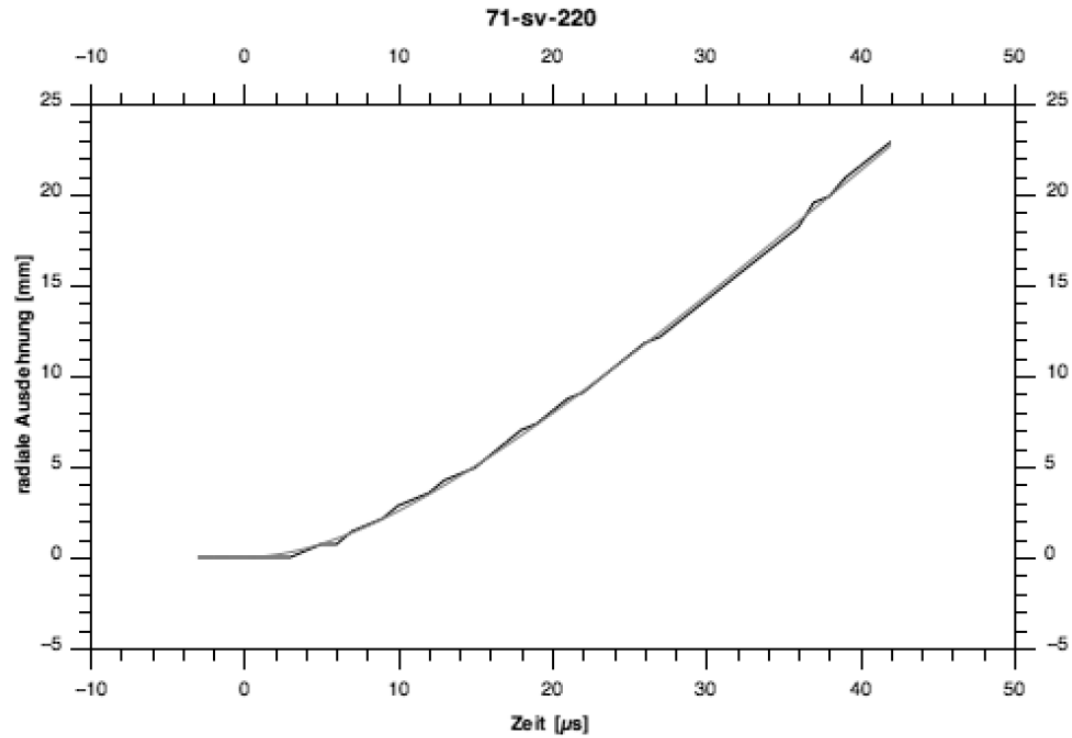
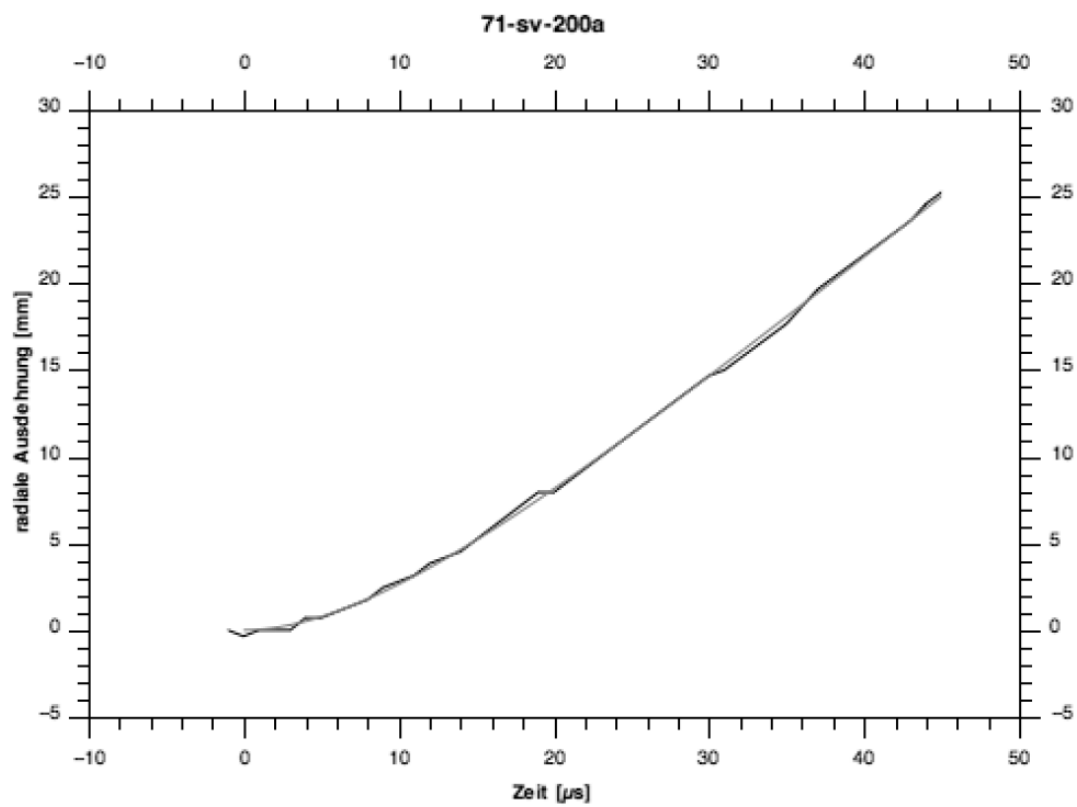


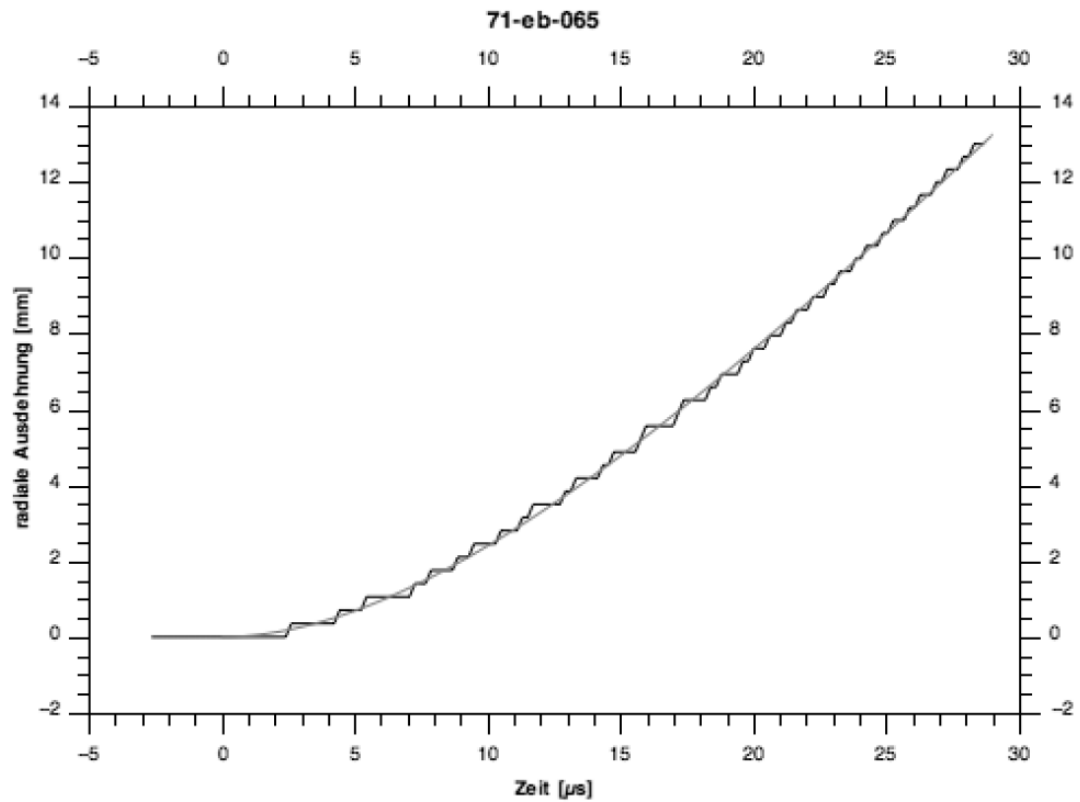
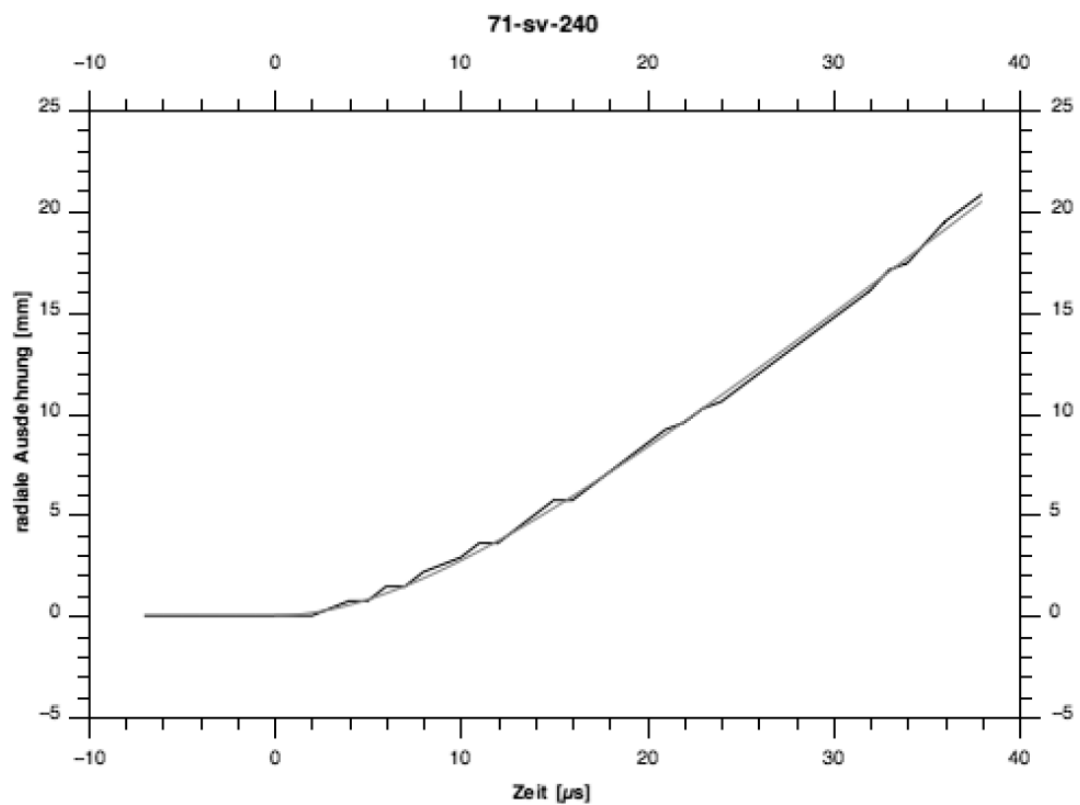


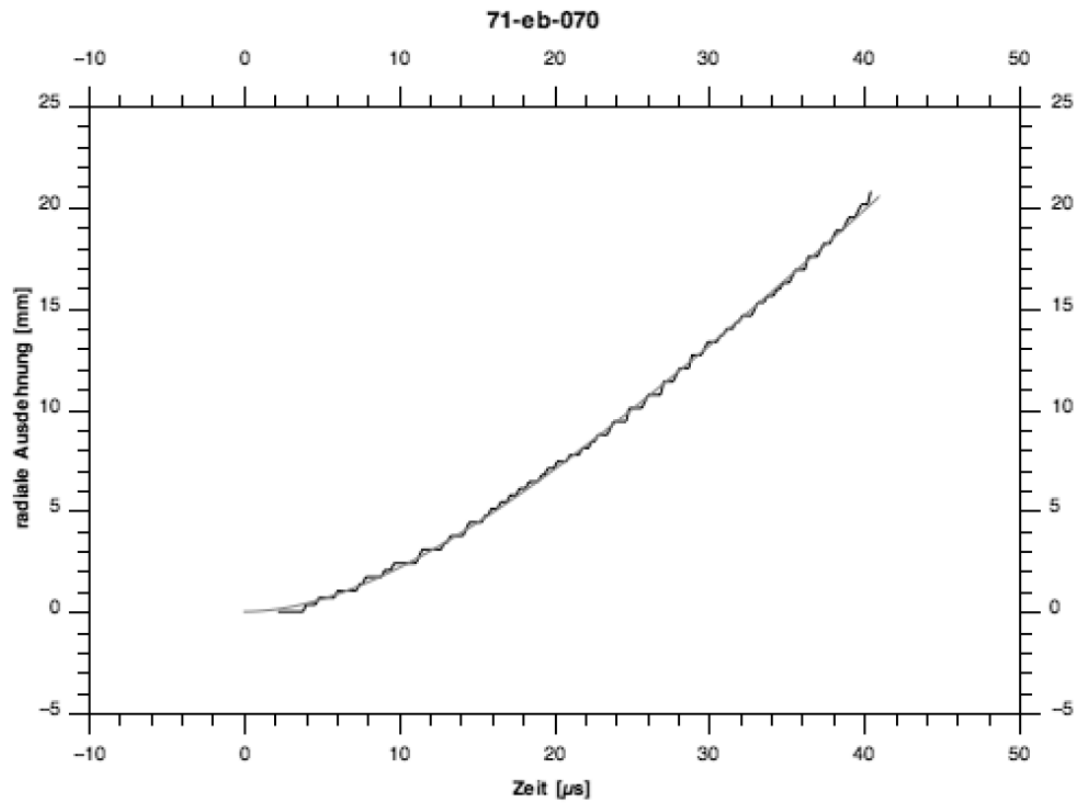
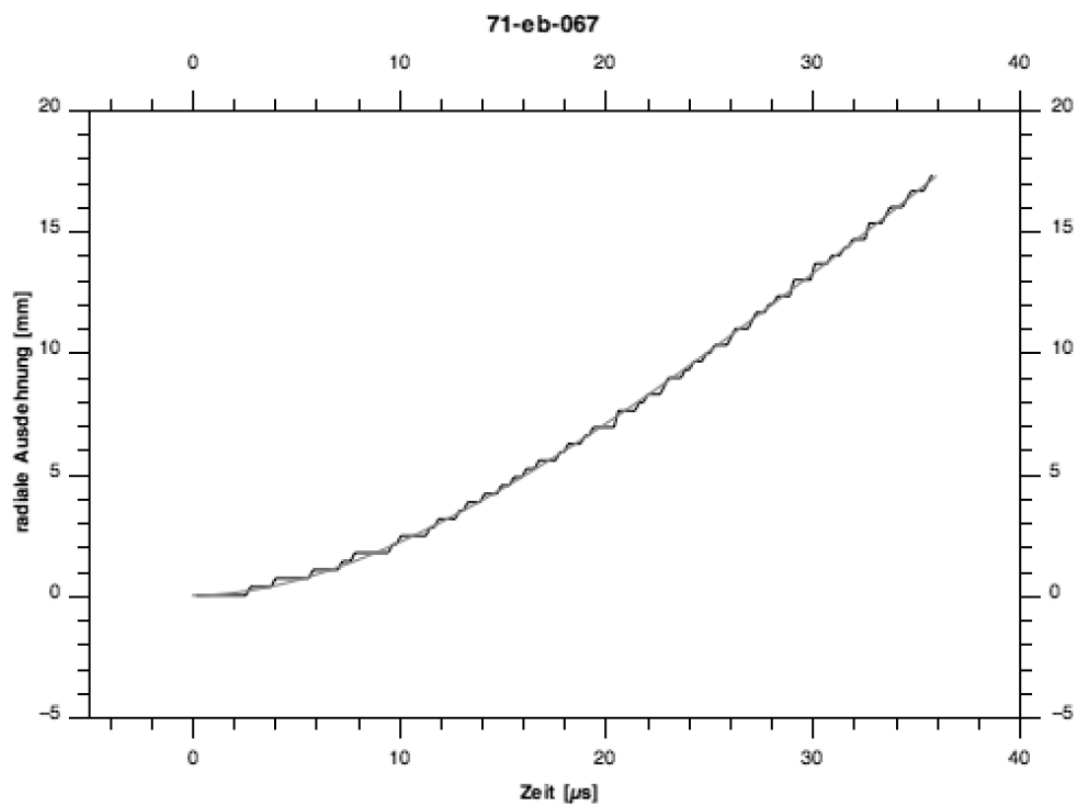


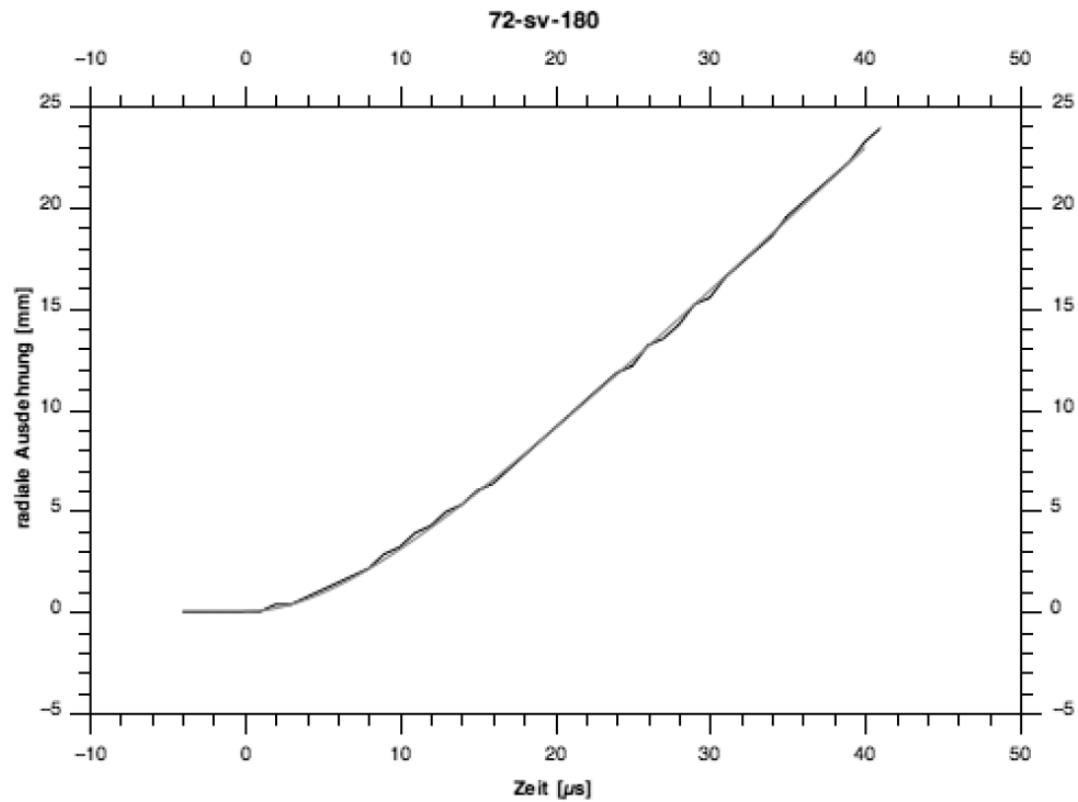
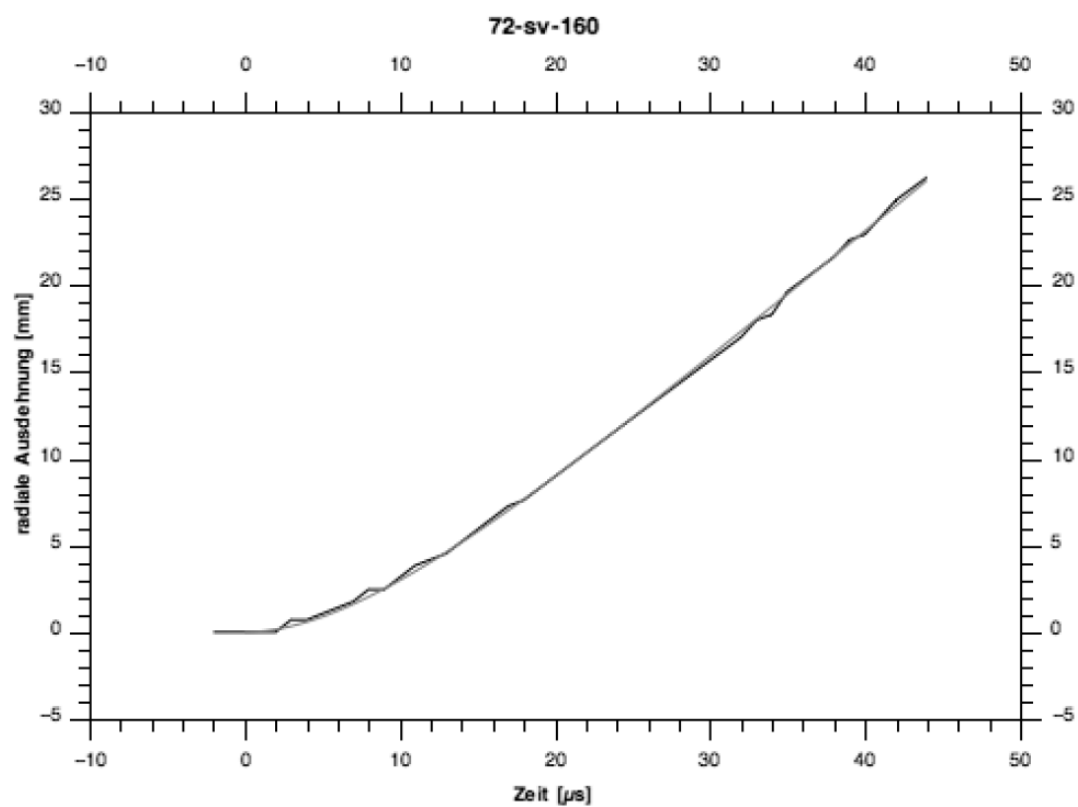


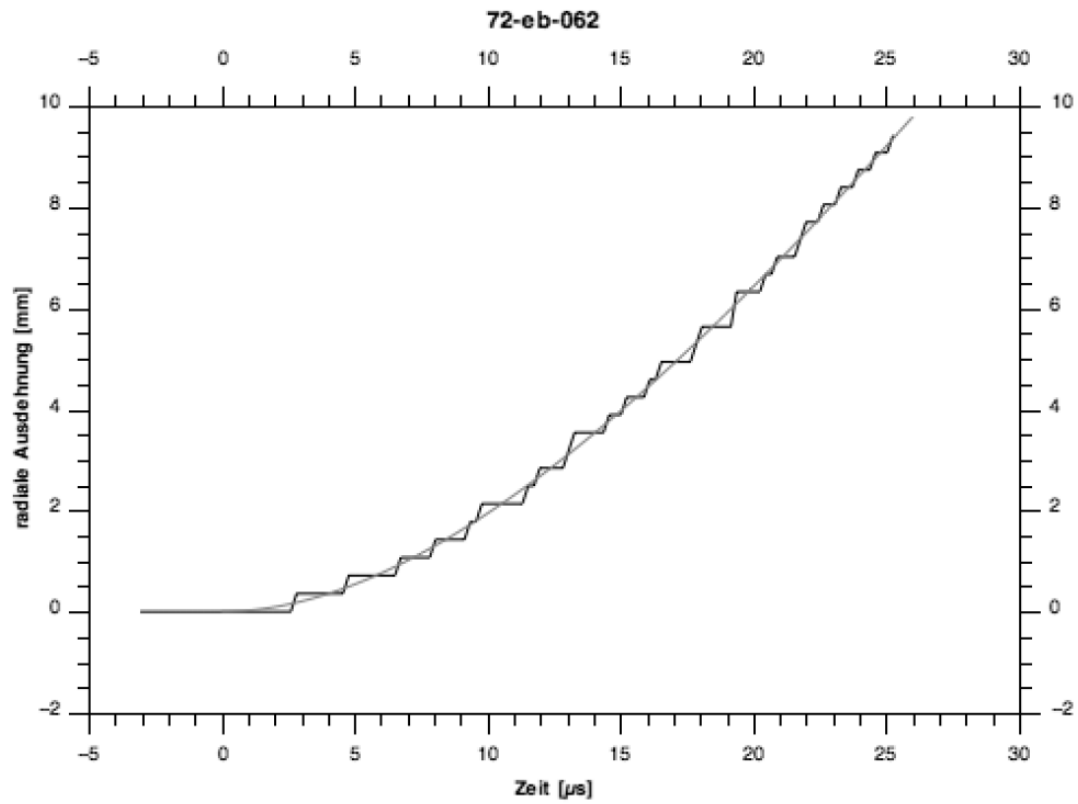
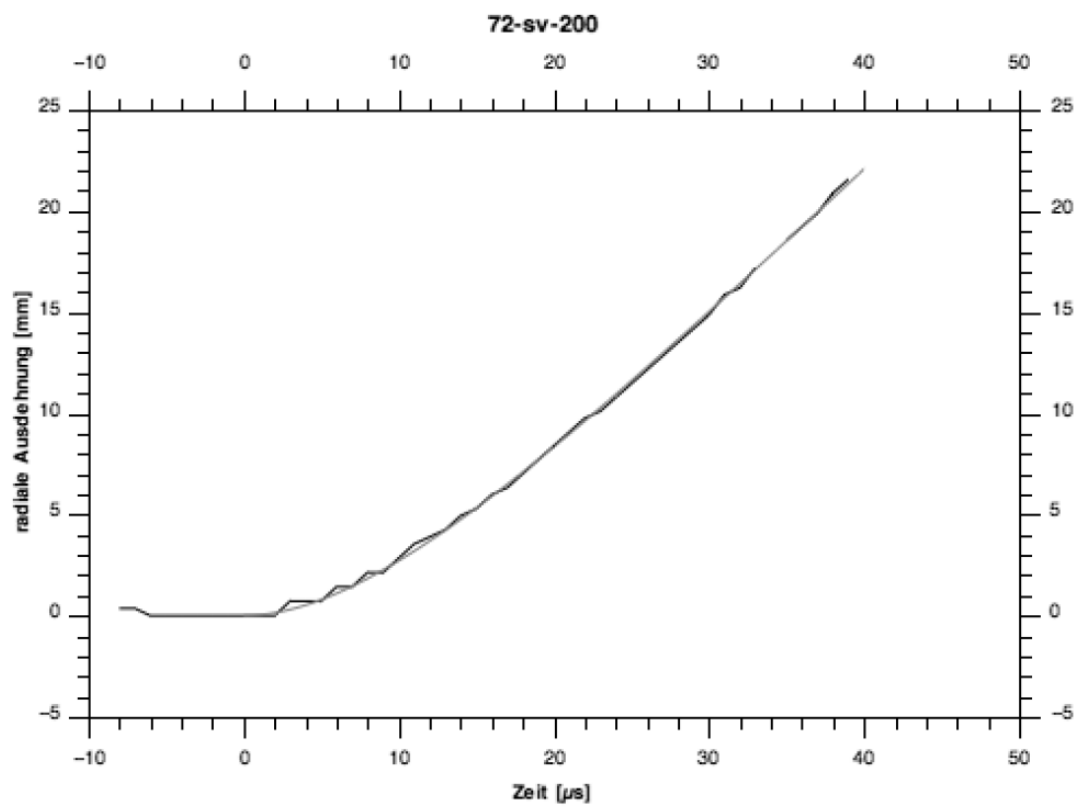


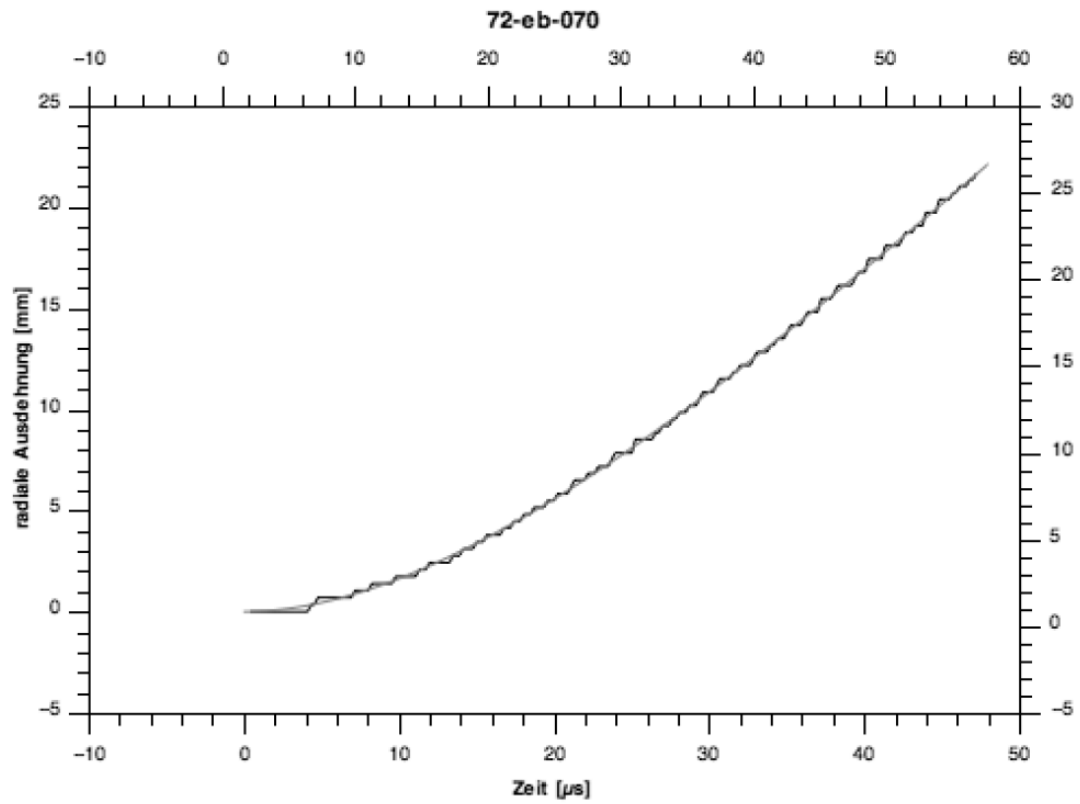
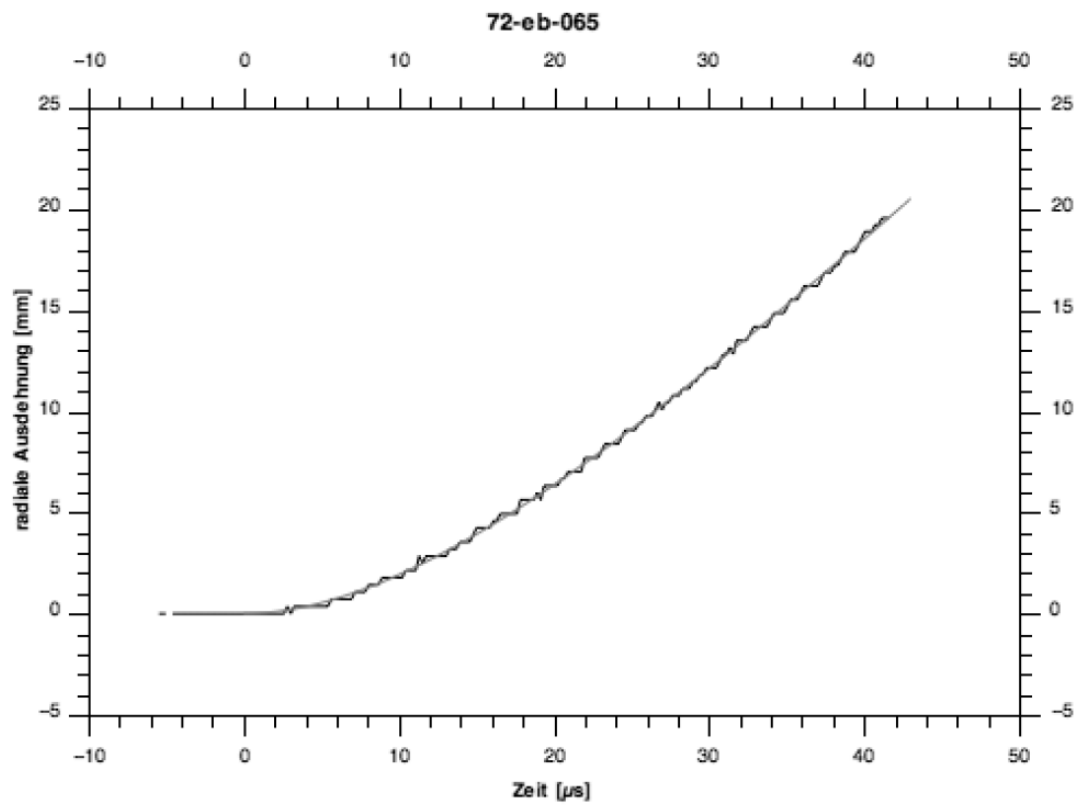


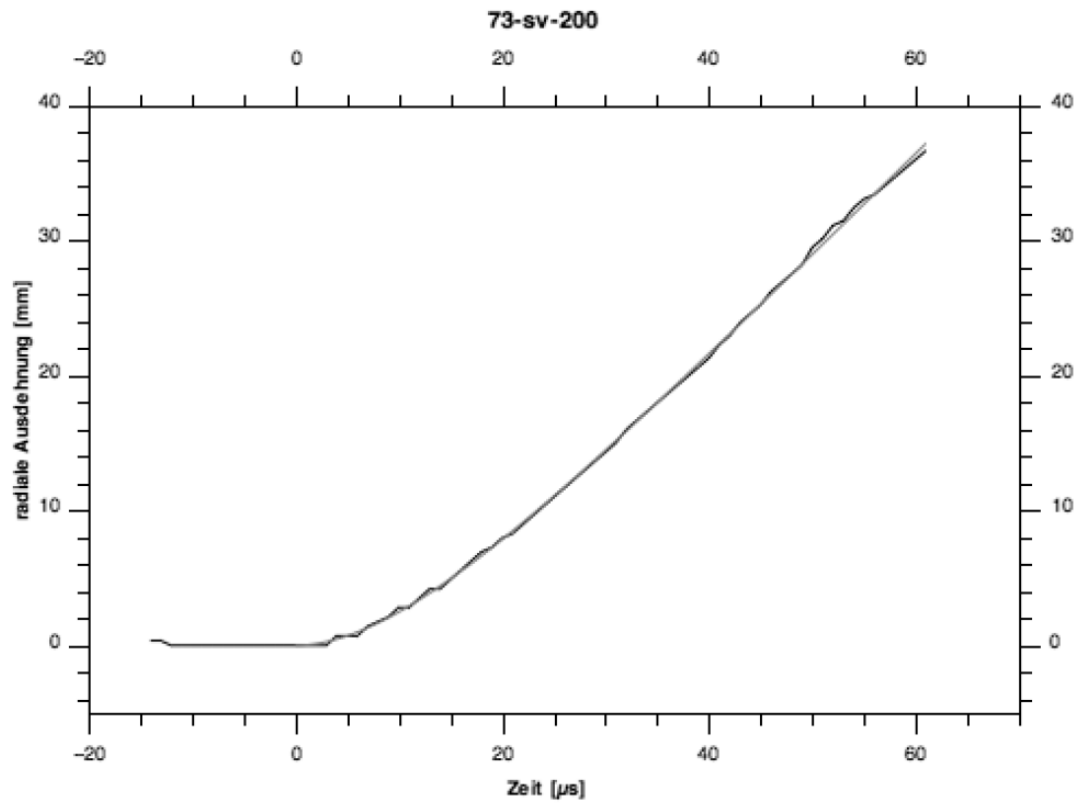
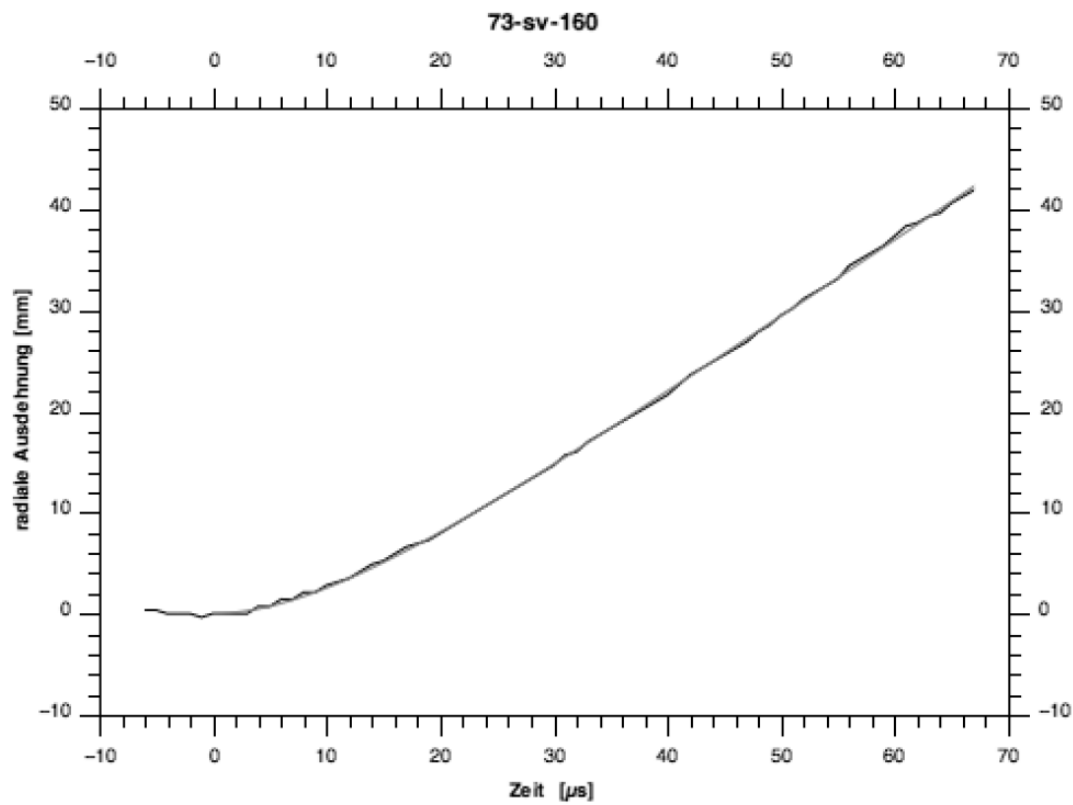


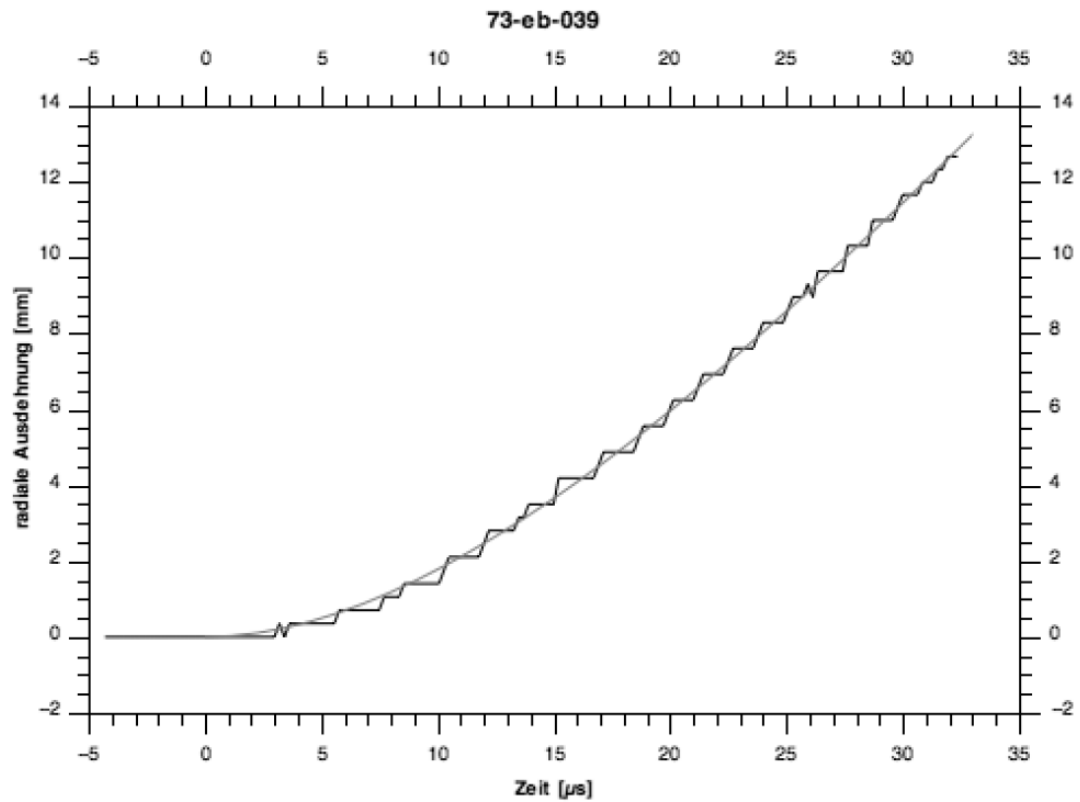
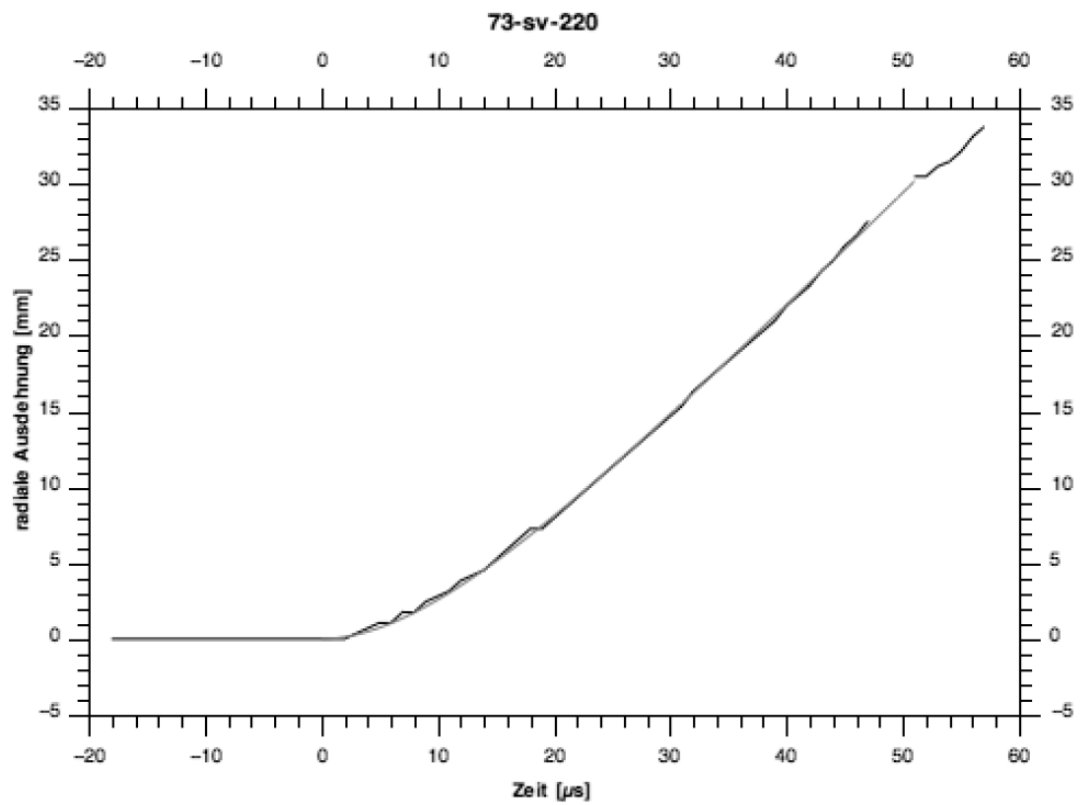












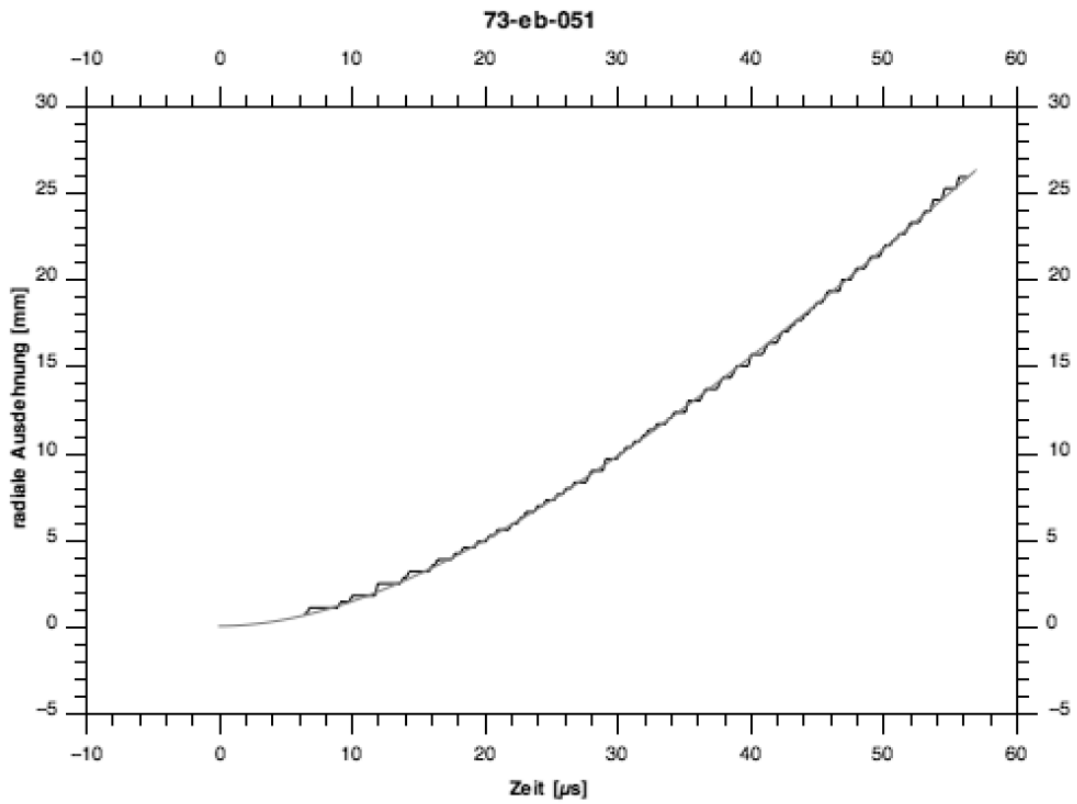
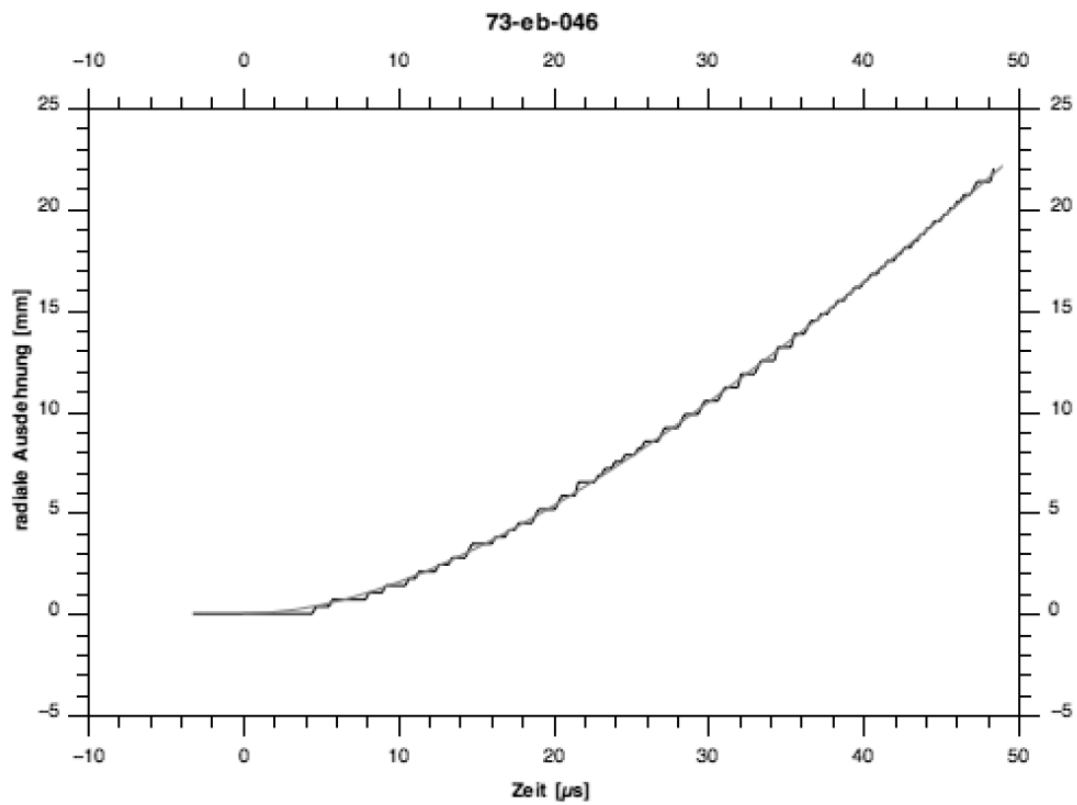
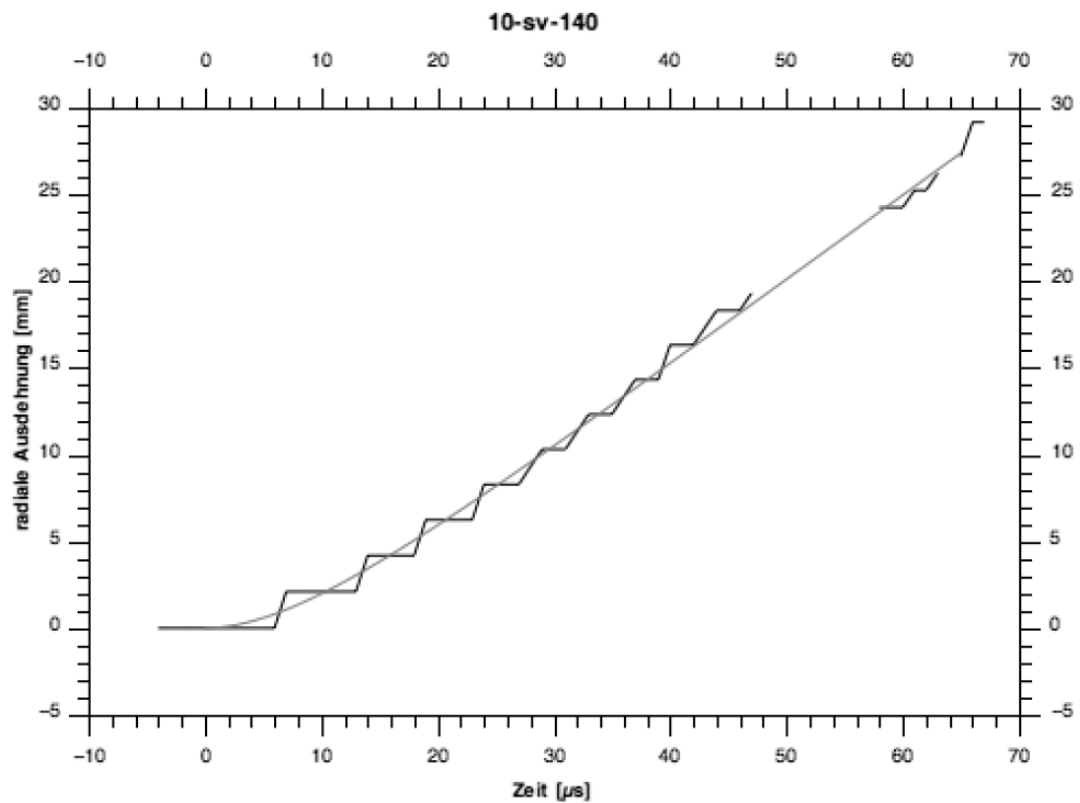
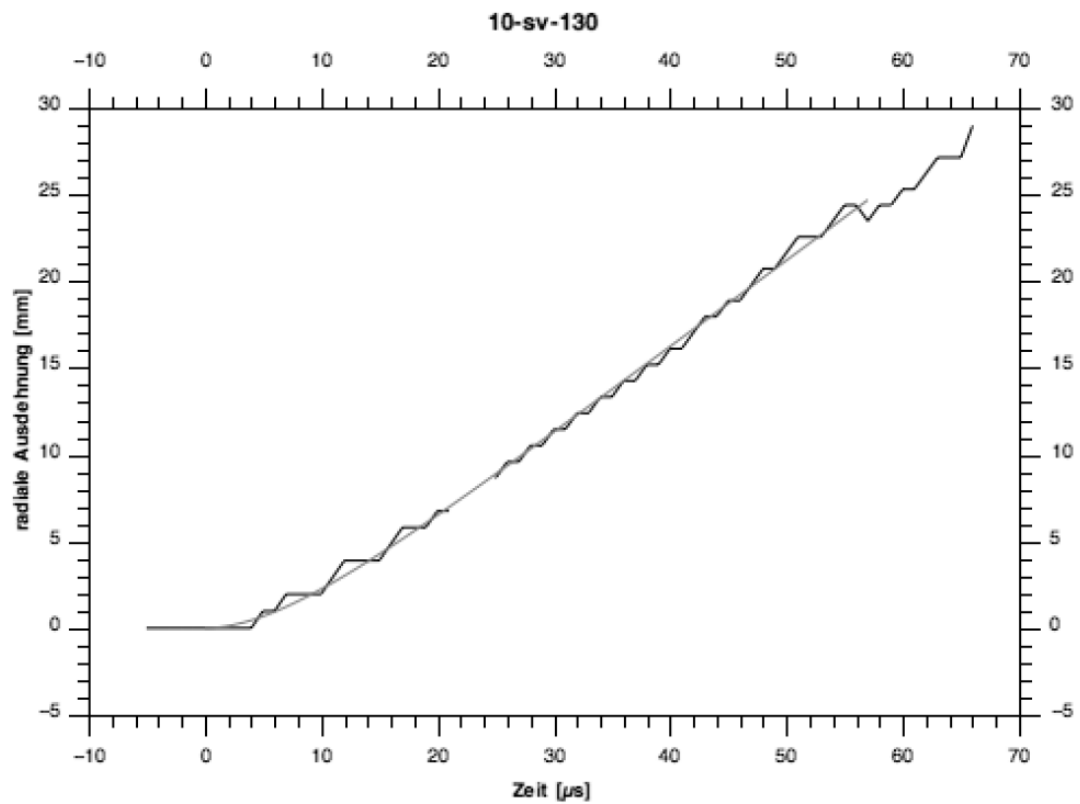


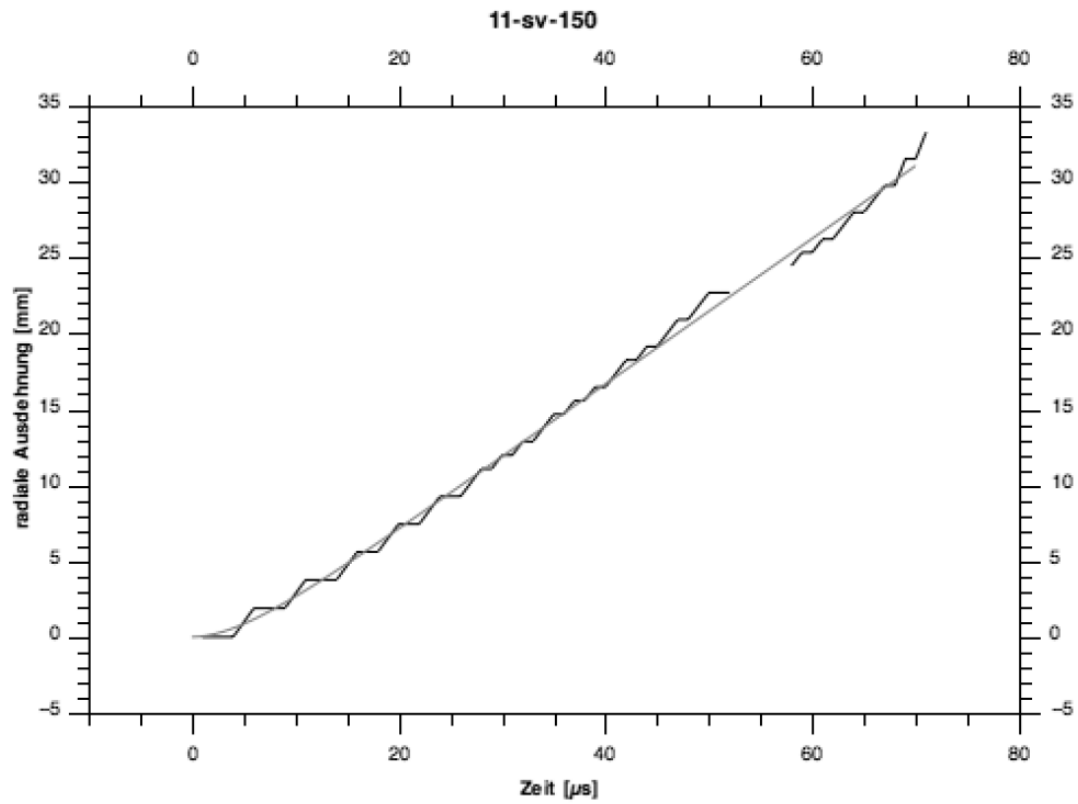
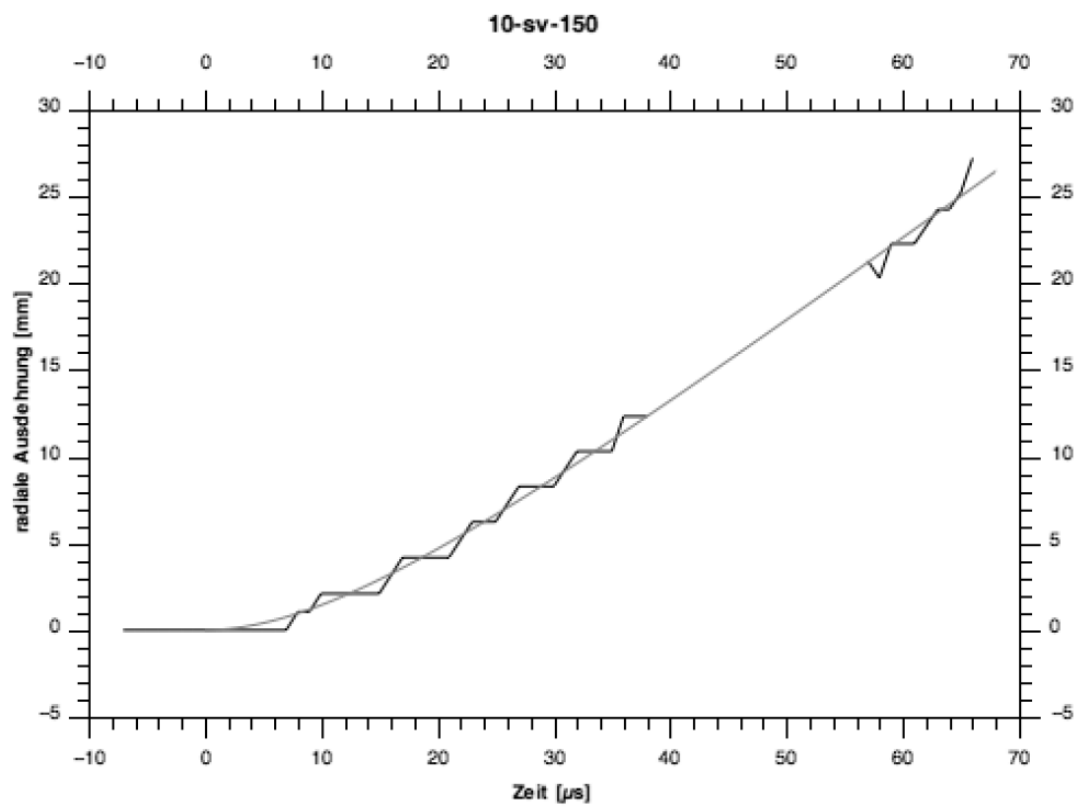
Tabelle 9.2: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Andex"

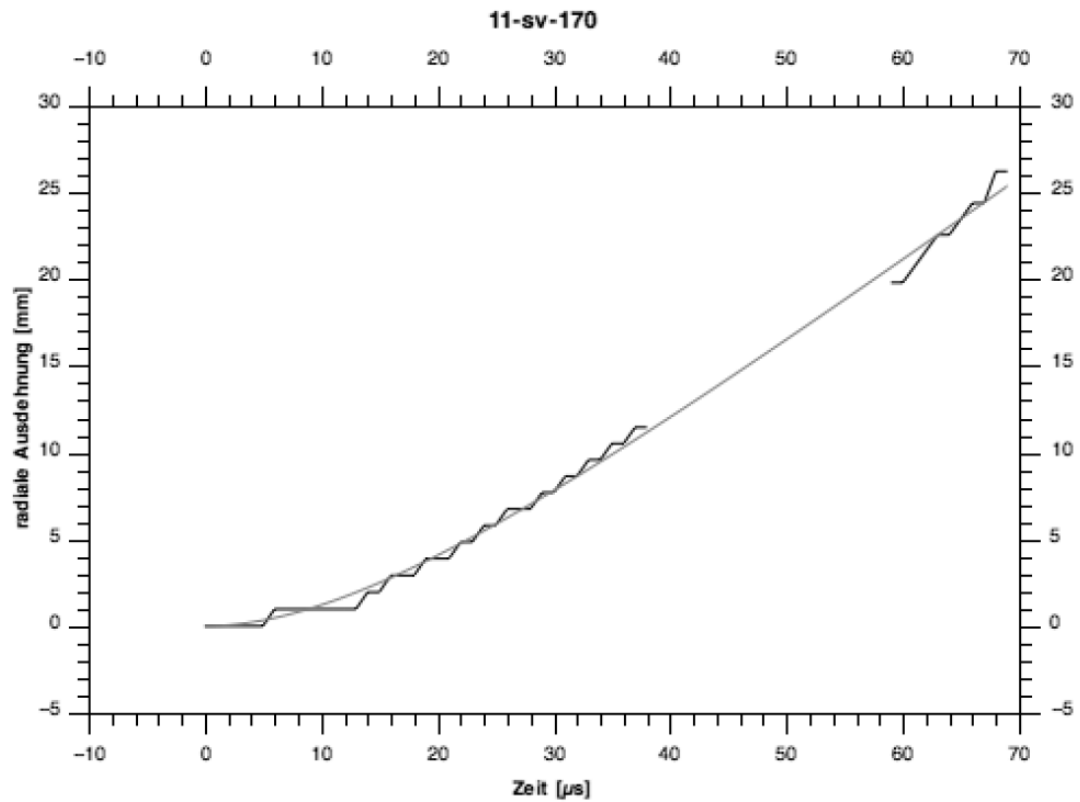
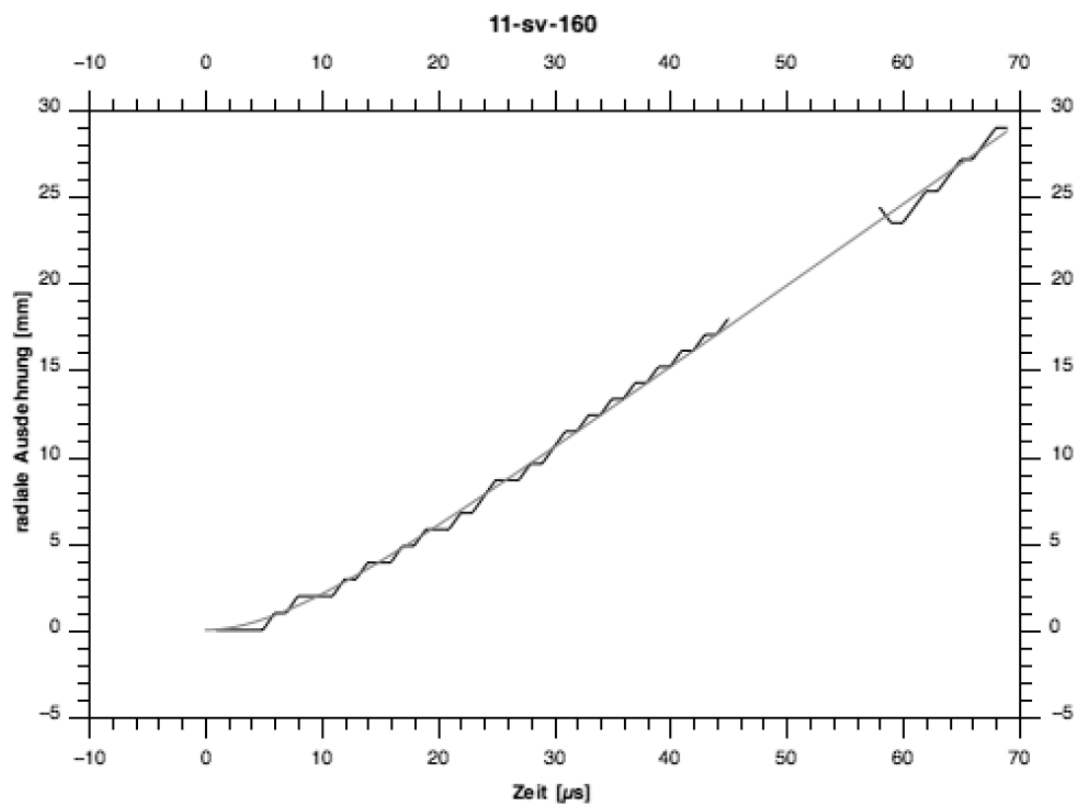
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter	
			$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/μs]	B_r [1/μs]
1	kein auswertbarer Film			
2	sv	150	0.75932	0.11339
		160	0.77741	0.10214
		170	0.75729	0.09231
3	kein Film			
4	sv	140	0.66080	0.13768
		150	0.68064	0.21972
5	sv	110	0.88901	0.08378
		120	0.88112	0.13881
6	sv	110	0.78513	0.16108
	sv	120	0.79377	0.22546
	sv	130	0.79892	0.12831
7	sv	110	0.79681	0.07938
	sv	120	0.74193	0.12420
	sv	140	0.77451	0.11071
8	sv	130	0.75067	0.14148
	sv	140	0.75672	0.12930
	sv	150	0.75628	0.09322
9	sv	110	0.79638	0.17026
	sv	120	0.76164	0.13199
	sv	130	0.79894	0.07285
32	sv	140	0.64385	0.23544
	sv	160	0.75932	0.17304
	sv	180	0.69653	0.25818

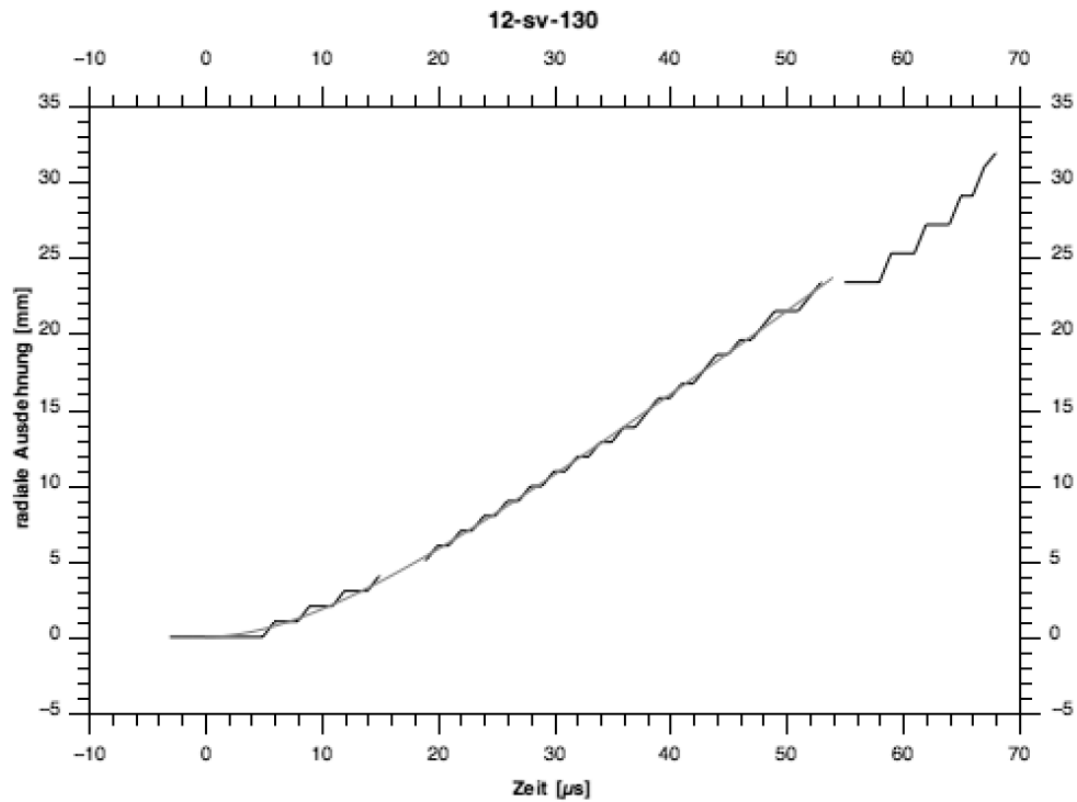
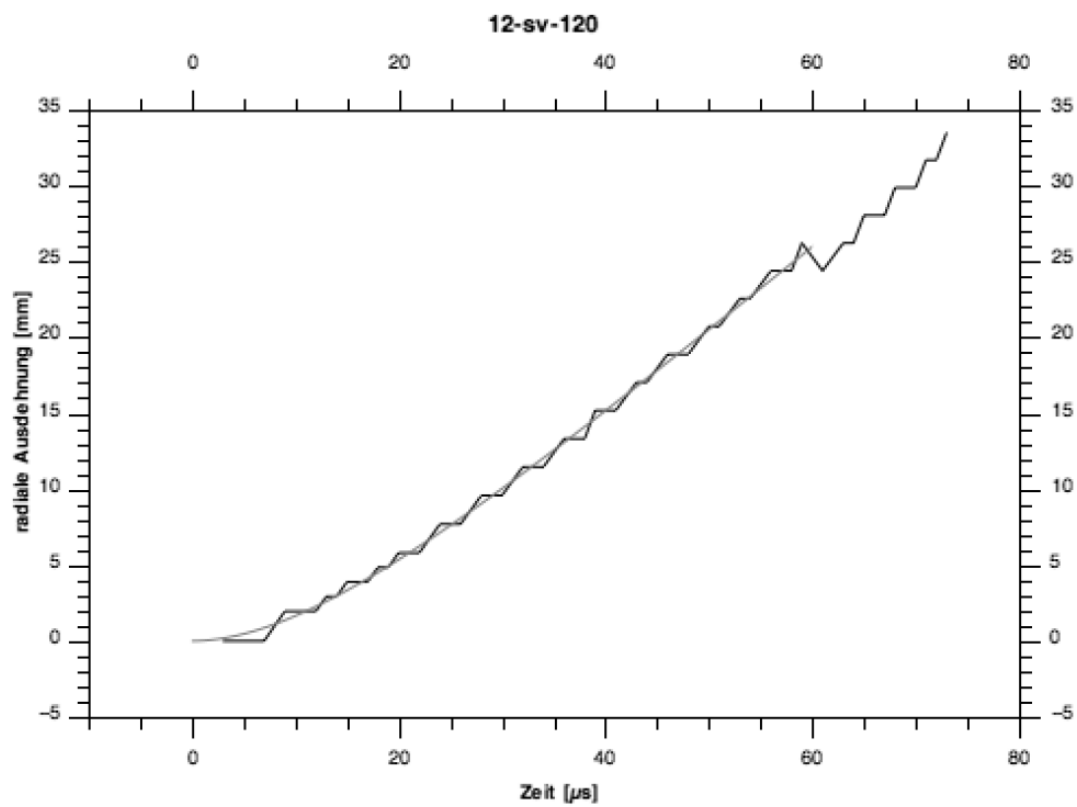
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter	
			$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/ μ s]	B_r [1/ μ s]
61	kein Film			
64	kein Film			
71	sv	200	0.70826	0.10232
	sv	220	0.71727	0.09483
	sv	240	0.71466	0.10492
	eb	065	0.71345	0.08830
	eb	067	0.73391	0.07479
	eb	070	0.72242	0.07588
72	sv	160	0.73716	0.11473
	sv	180	0.71443	0.12547
	sv	200	0.72706	0.10197
	eb	062	0.71311	0.06726
	eb	065	0.71063	0.06666
	eb	070	0.71820	0.05370
73	sv	160	0.75857	0.08824
	sv	200	0.75426	0.08524
	sv	220	0.75305	0.09030
	eb	039	0.70010	0.06171
	eb	046	0.71624	0.05060
	eb	051	0.71419	0.04596

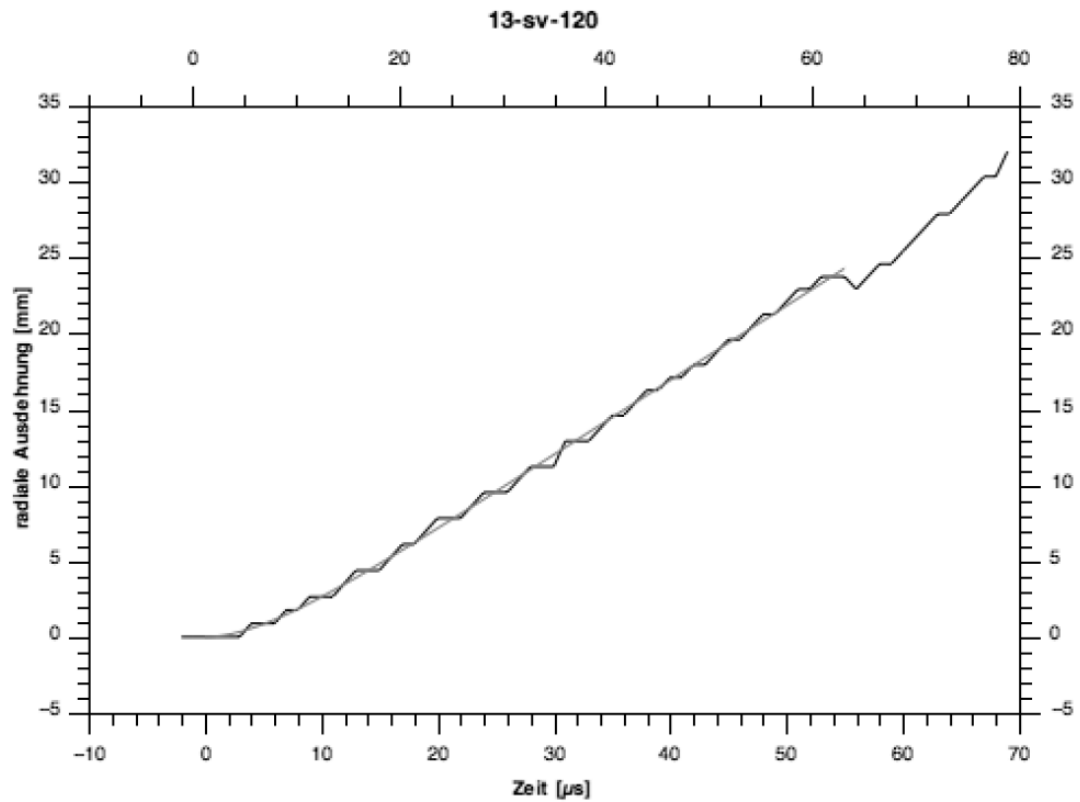
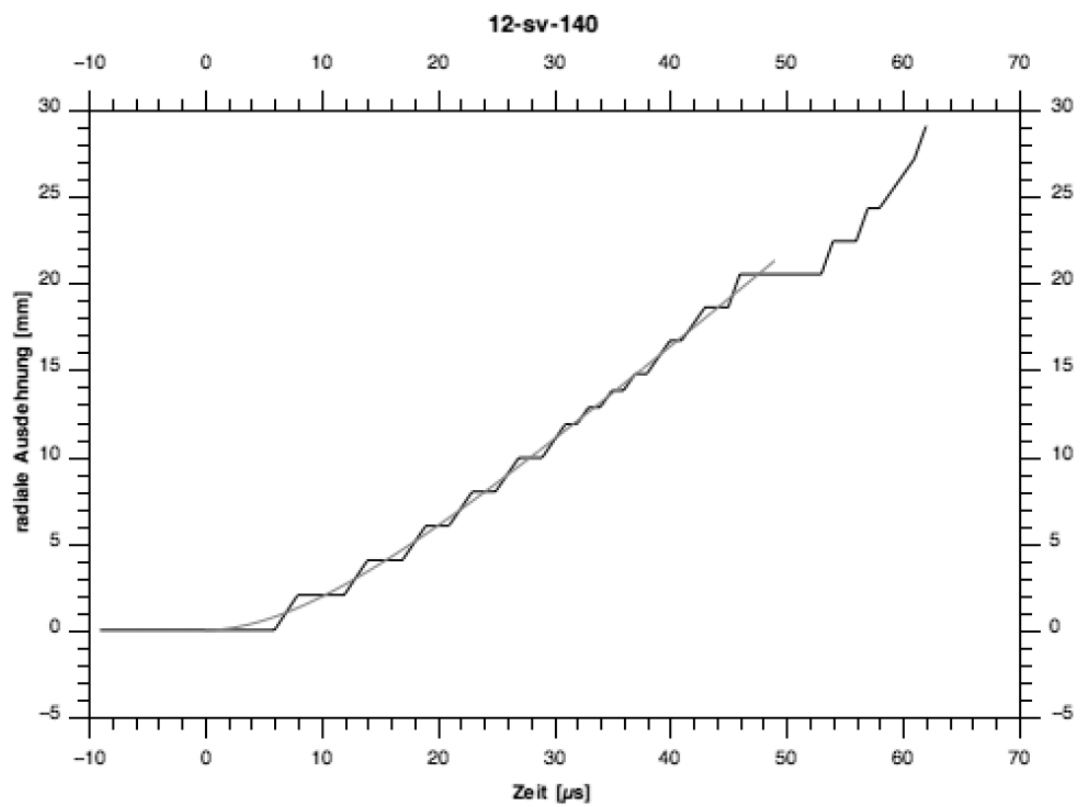
9.2.2. "Wetter-Westfalit C", Maxam Deutschland GmbH

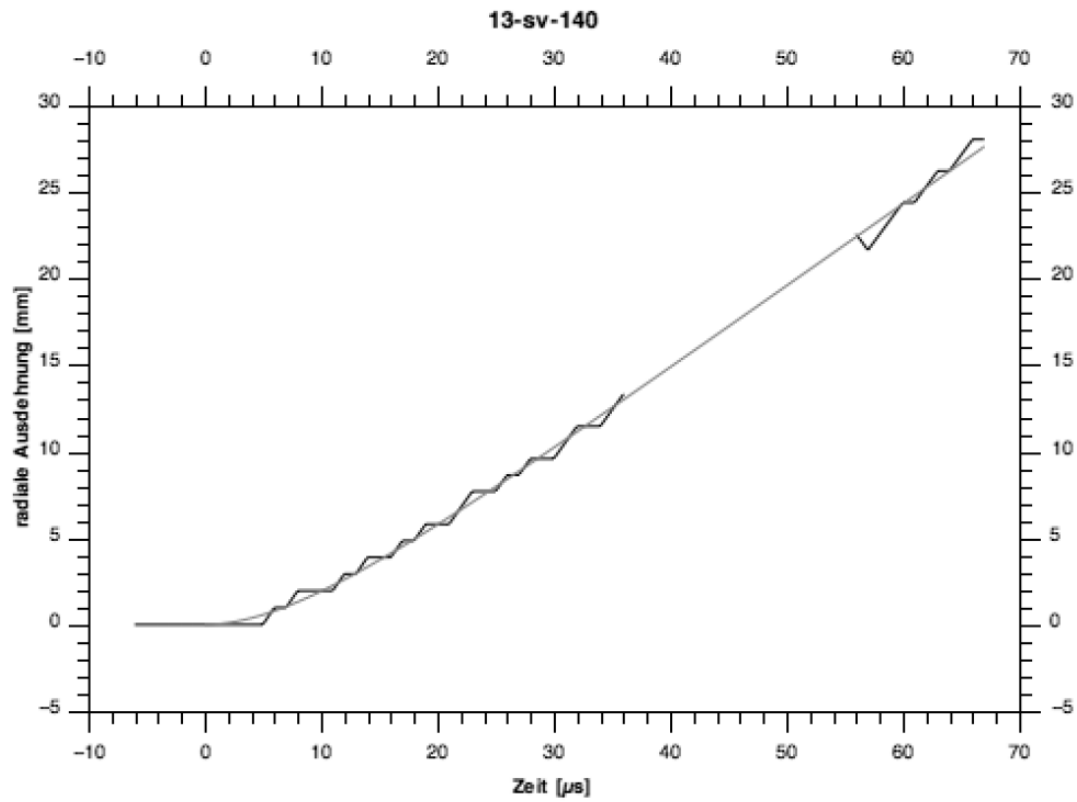
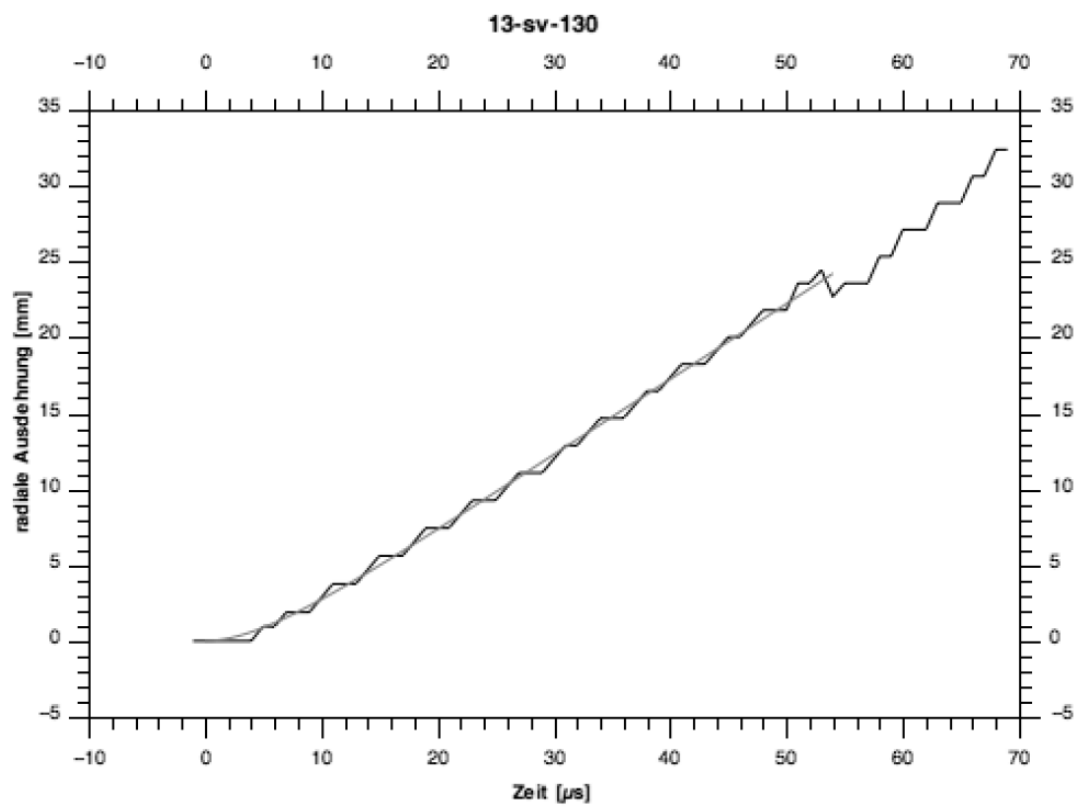


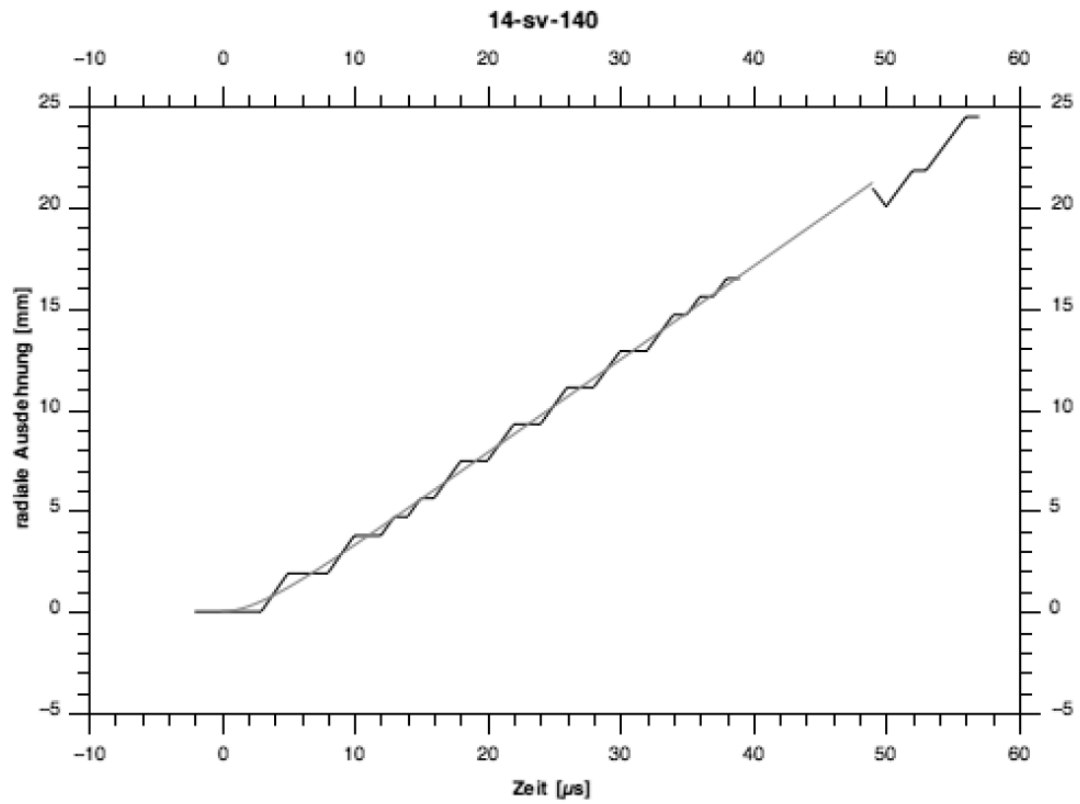
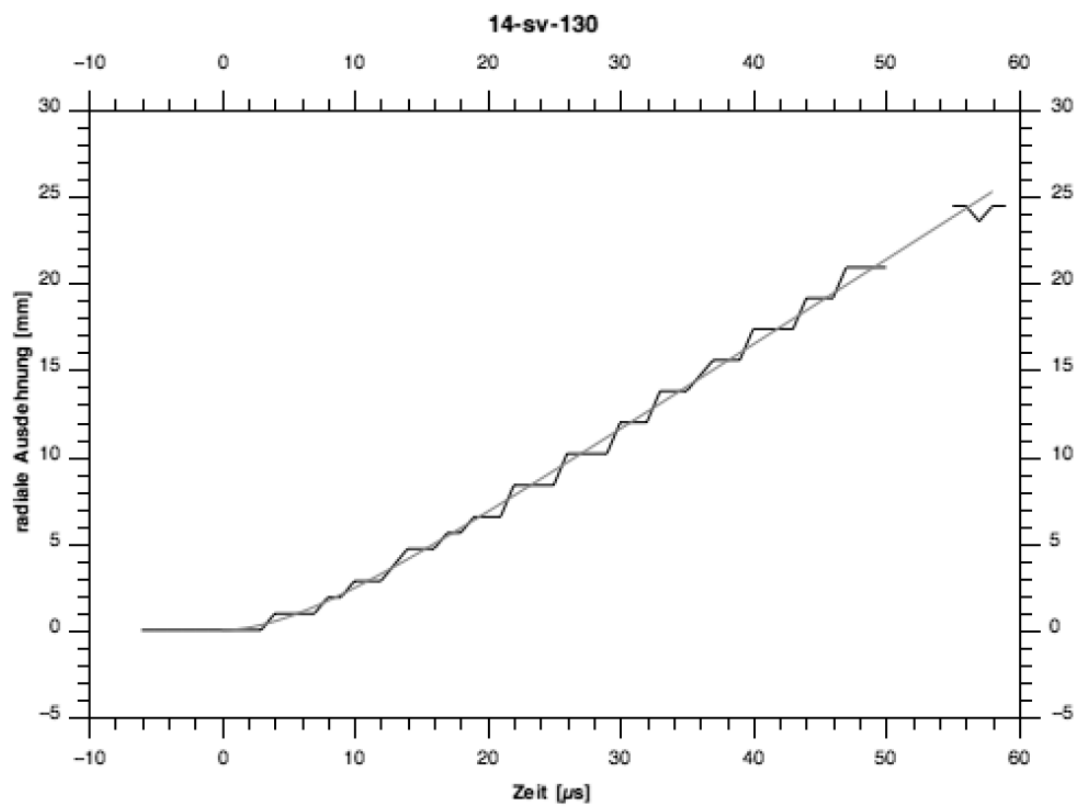












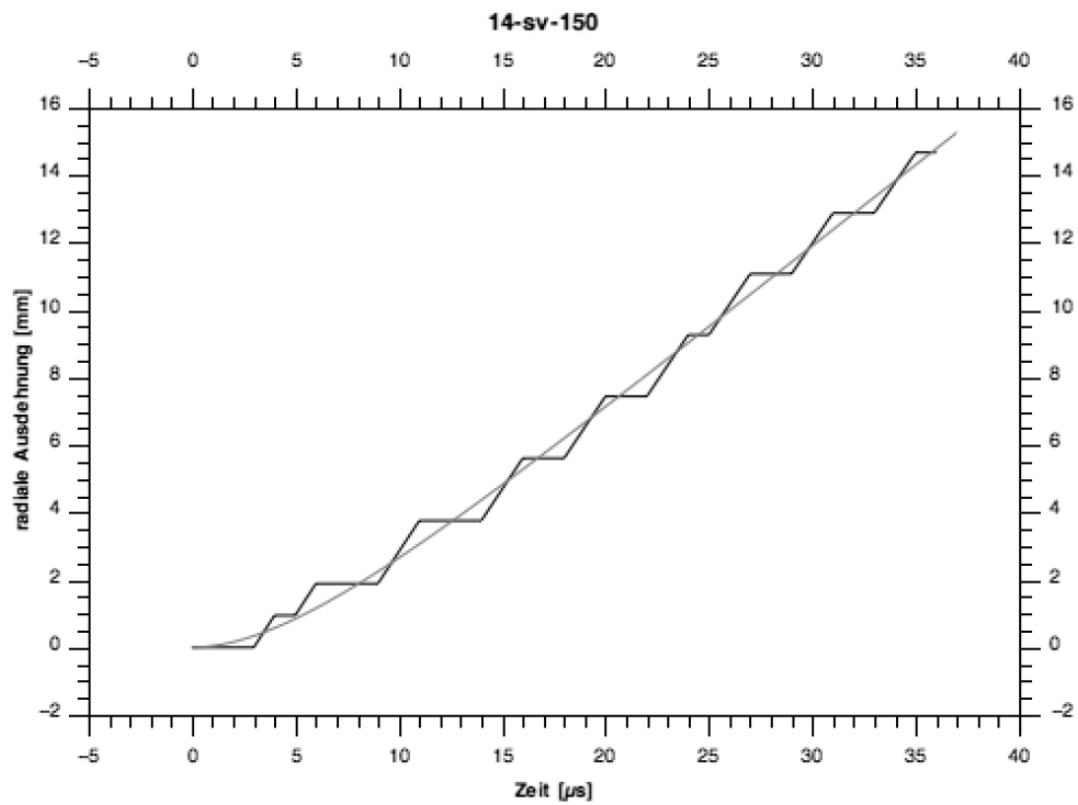
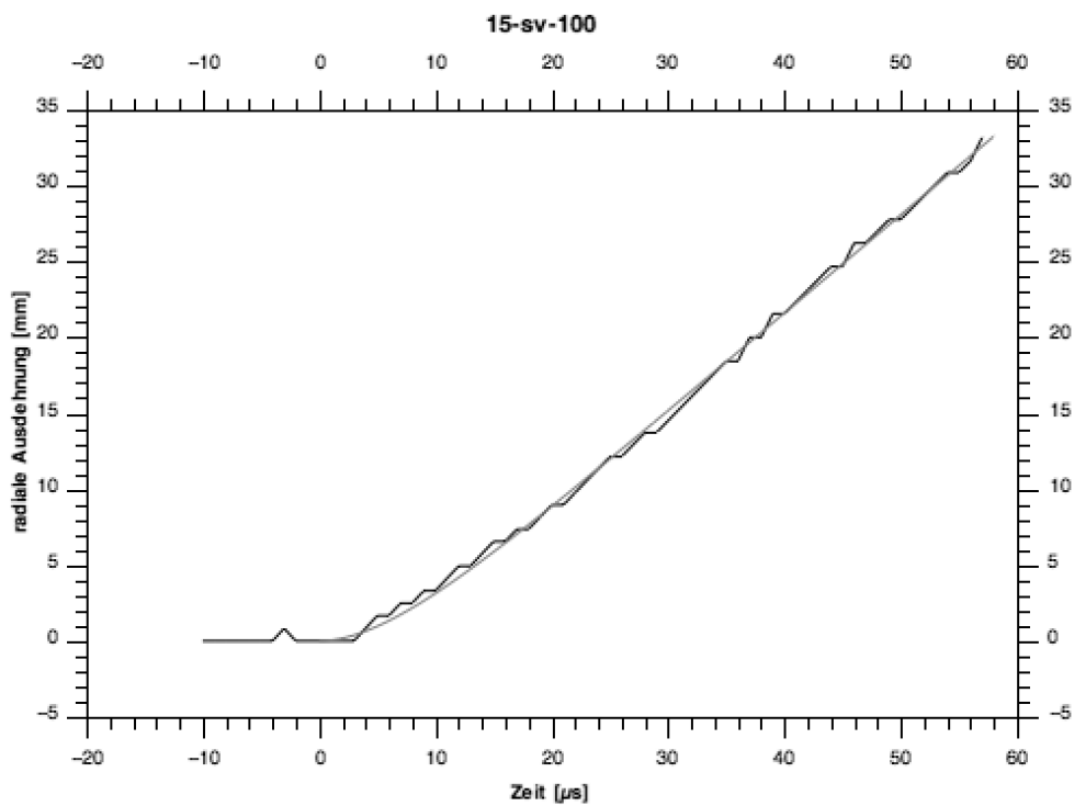
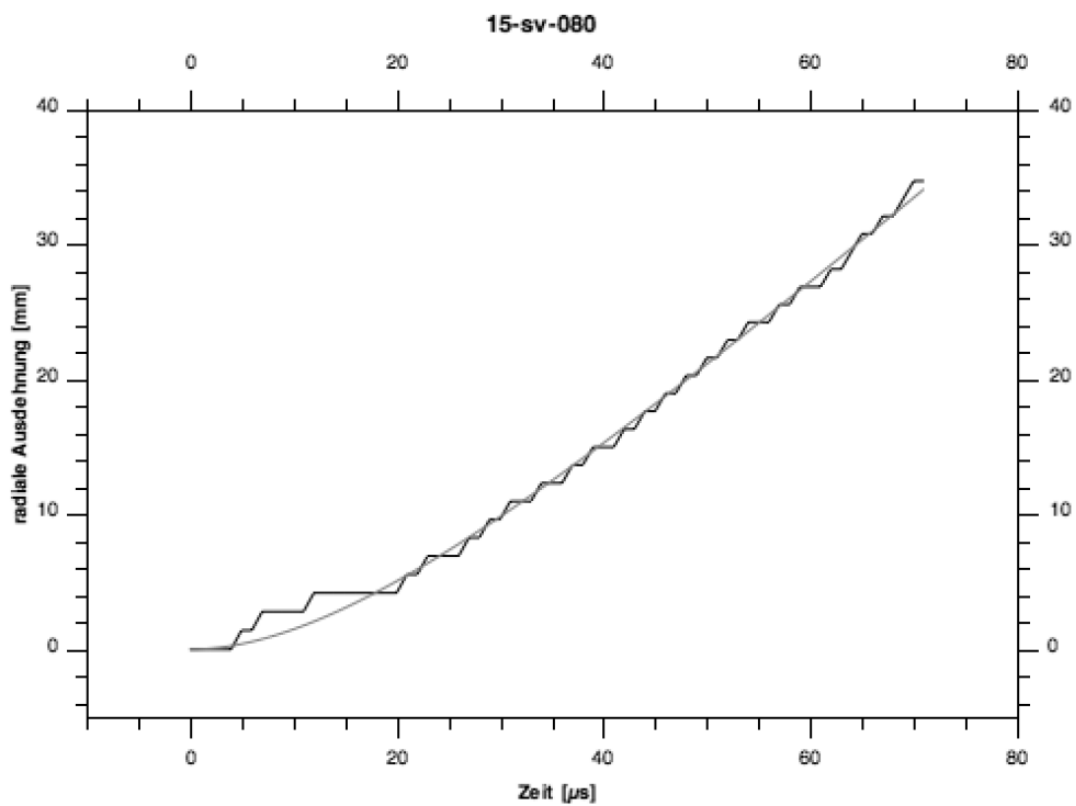
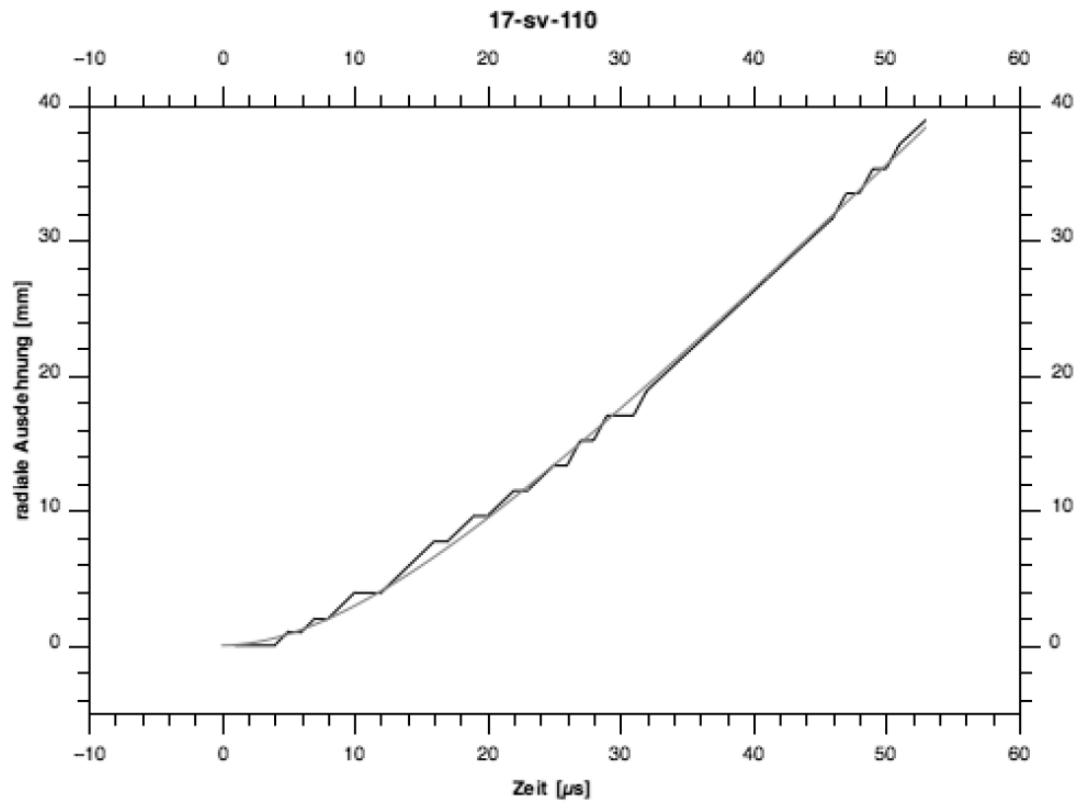
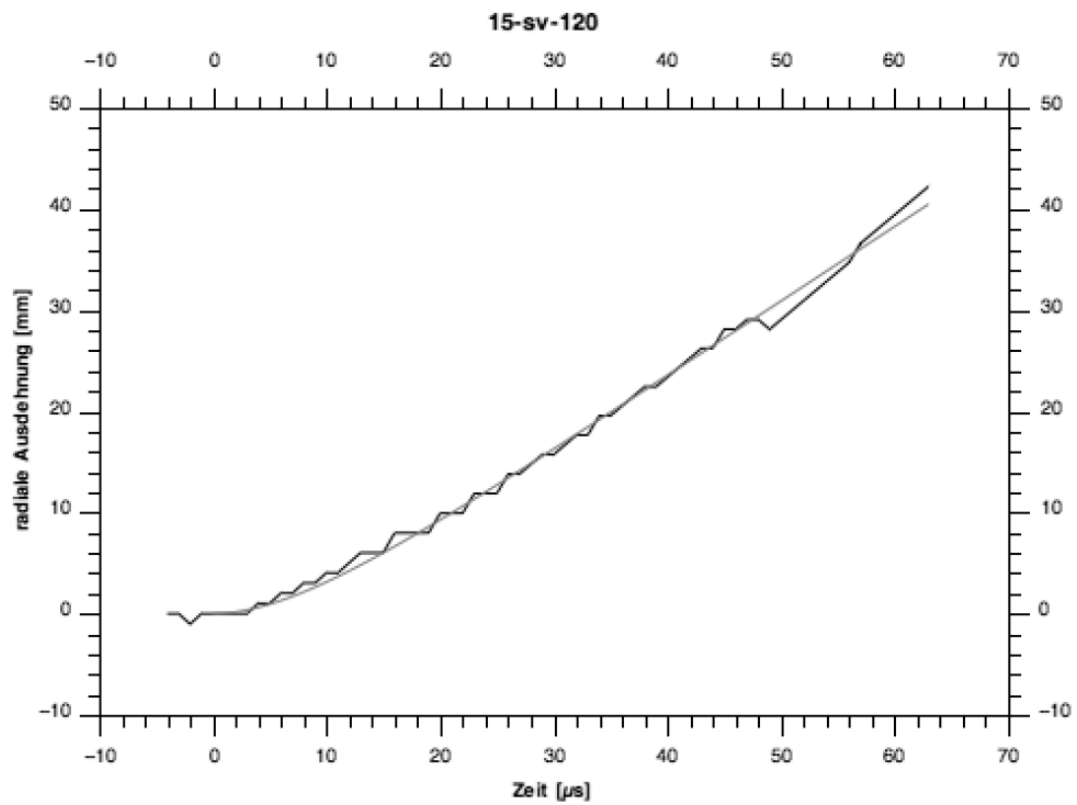


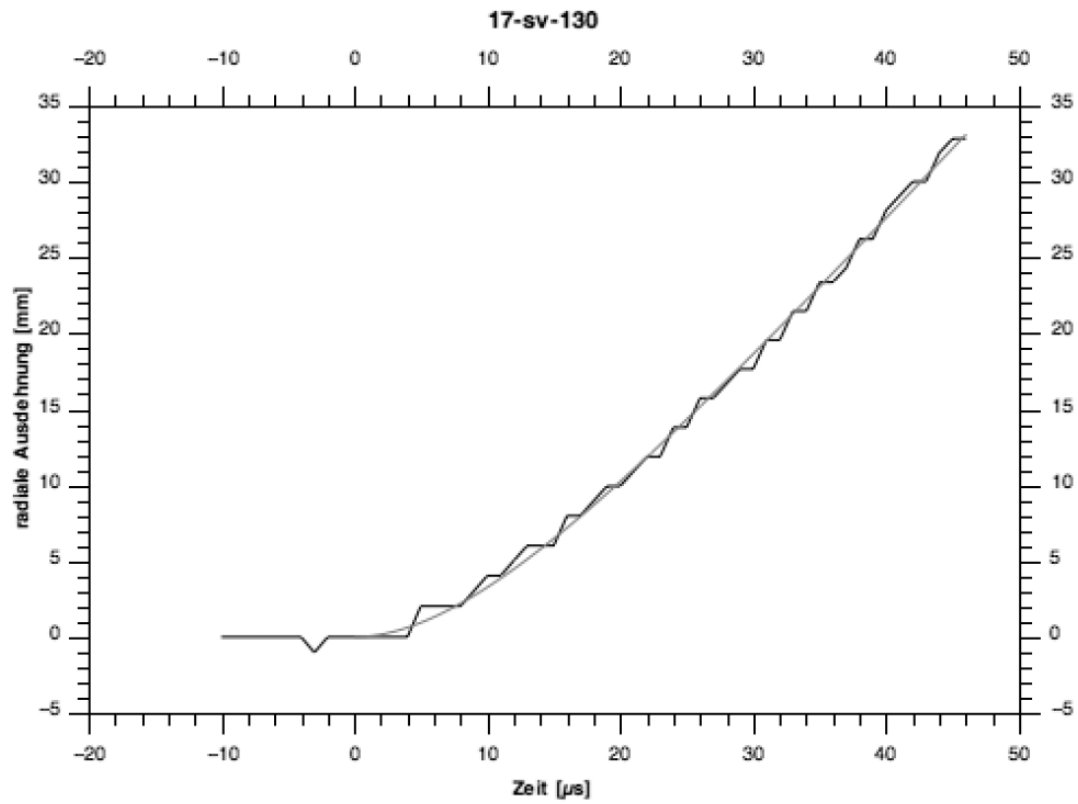
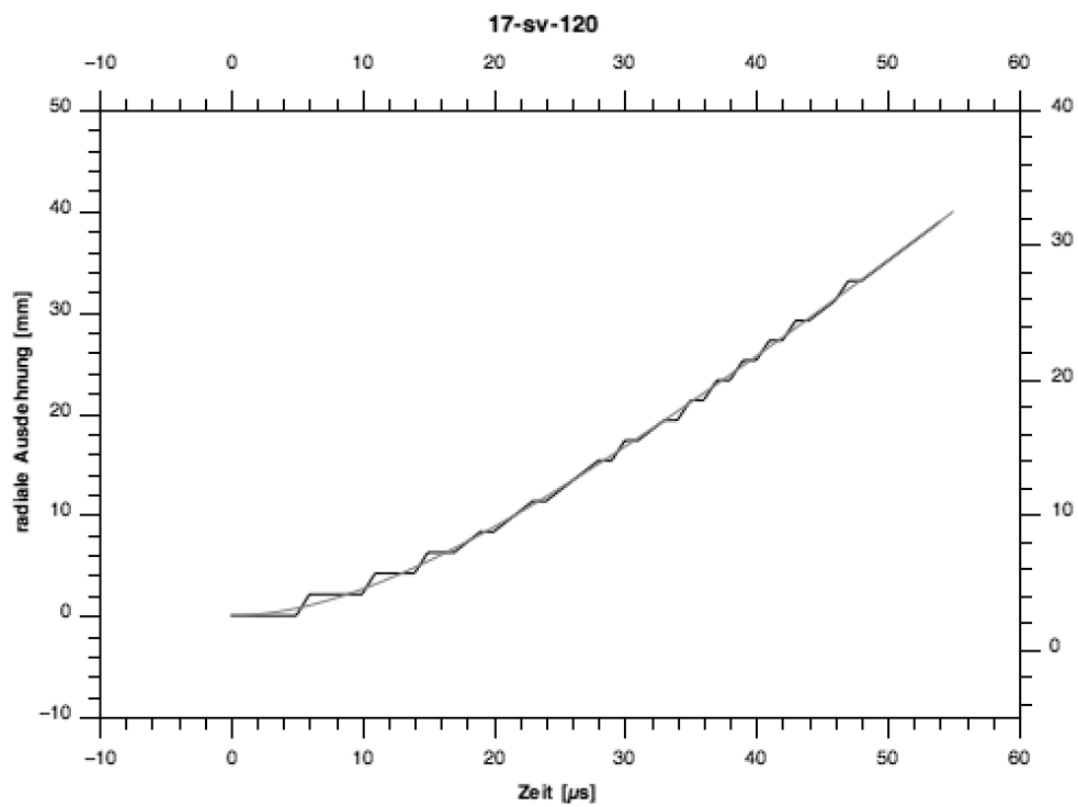
Tabelle 9.3: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Wetter-Westfalit C"

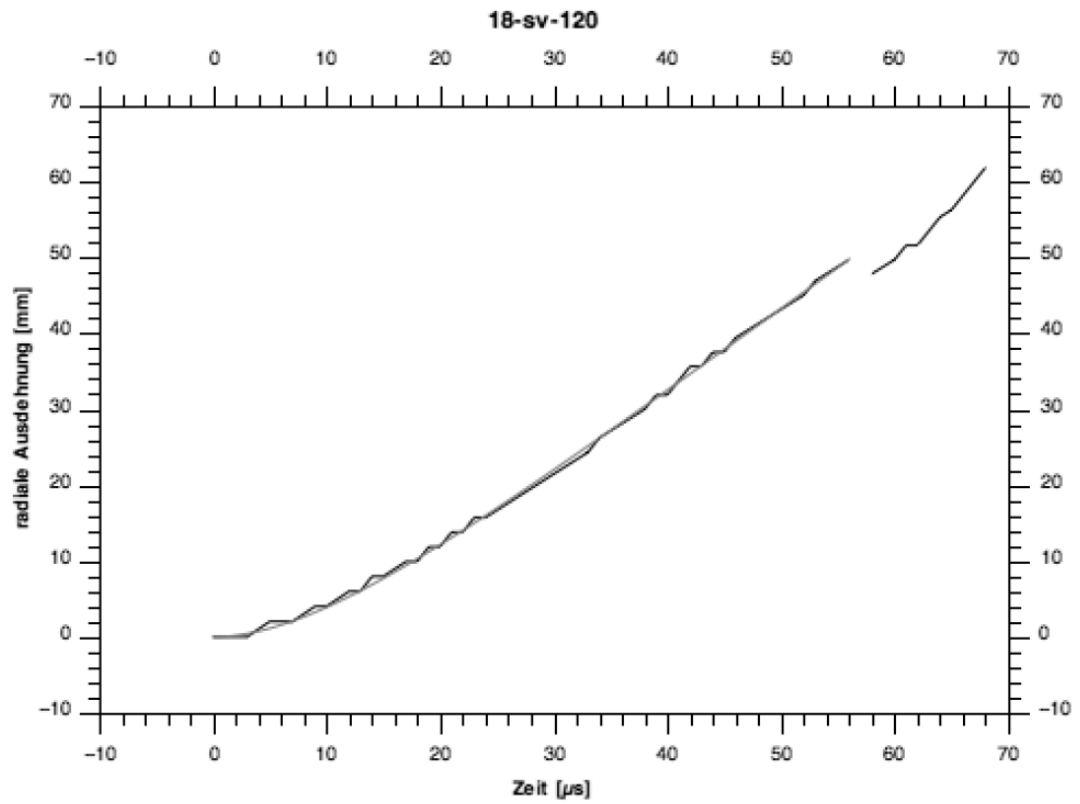
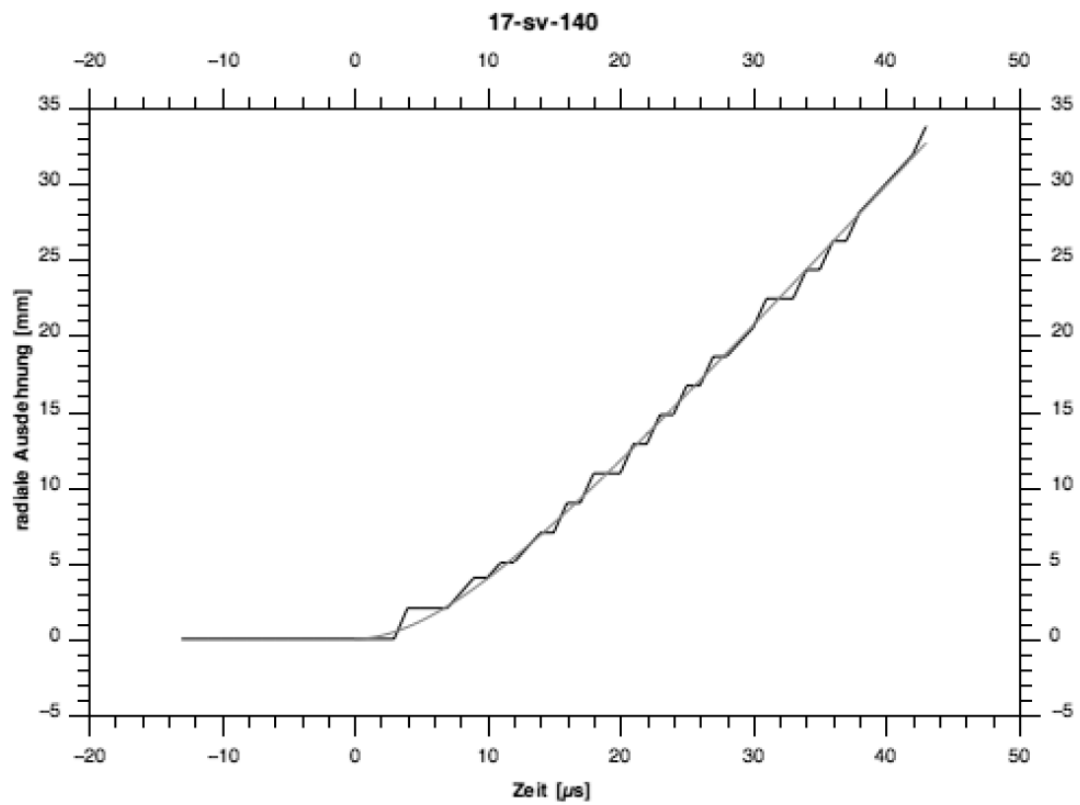
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter $\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/ μ s]	B_r [1/ μ s]
10	sv	130	0.49777	0.13494
		140	0.48642	0.11518
		150	0.48205	0.07582
11	sv	150	0.47930	0.19140
		160	0.46979	0.12906
		170	0.47831	0.06182
12	sv	120	0.55417	0.07535
		130	0.56195	0.08333
		140	0.56046	0.08985
13	sv	120	0.49158	0.17859
		130	0.49726	0.18775
		140	0.47361	0.11529
14	sv	130	0.48961	0.15723
		140	0.46071	0.33670
		150	0.48193	0.18822

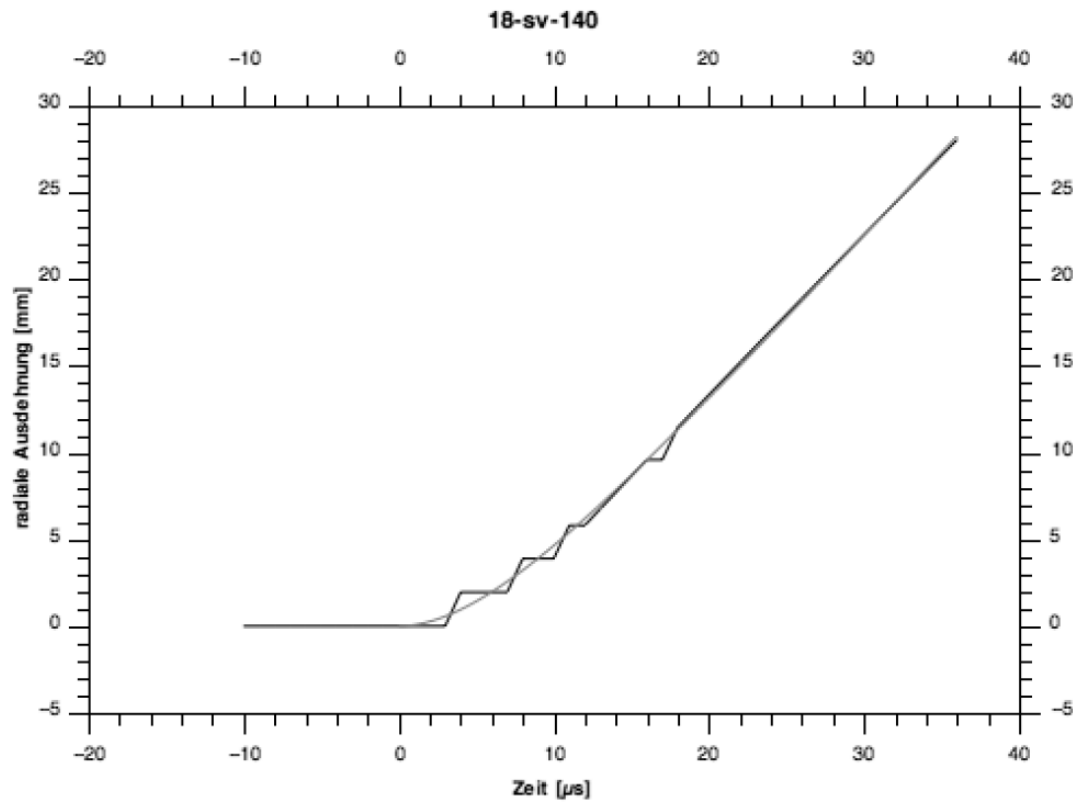
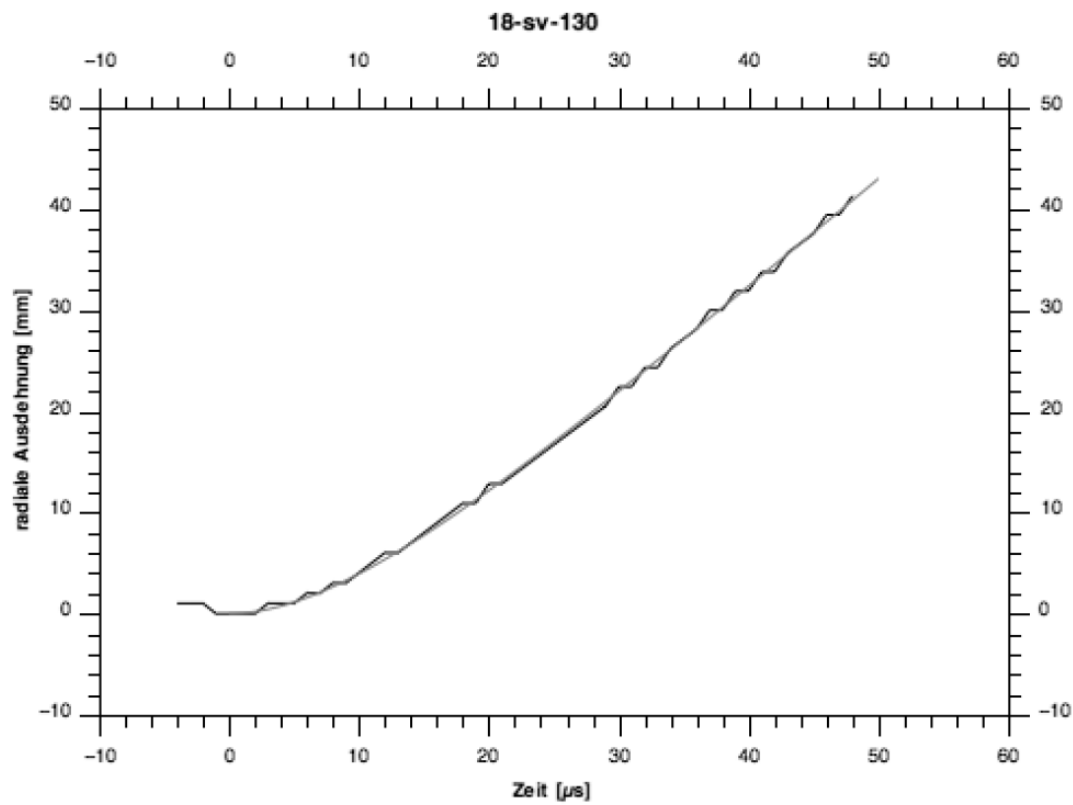
9.2.3. "Emulgit 42G", Maxam Deutschland GmbH

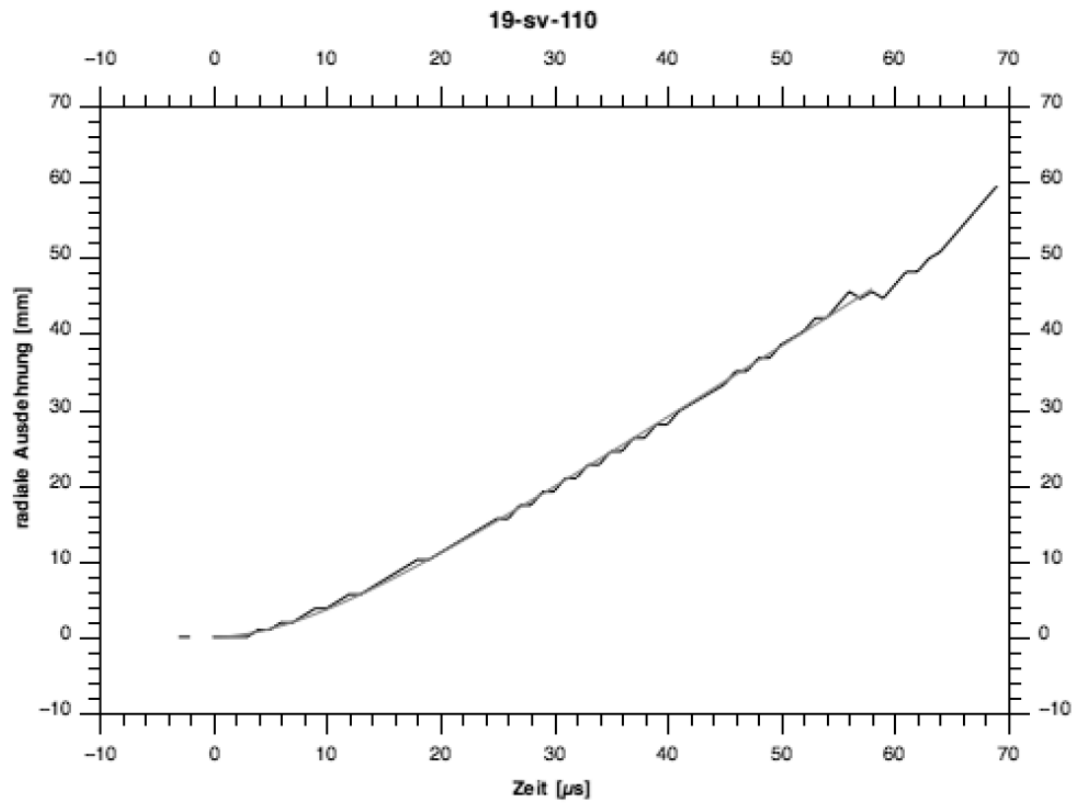
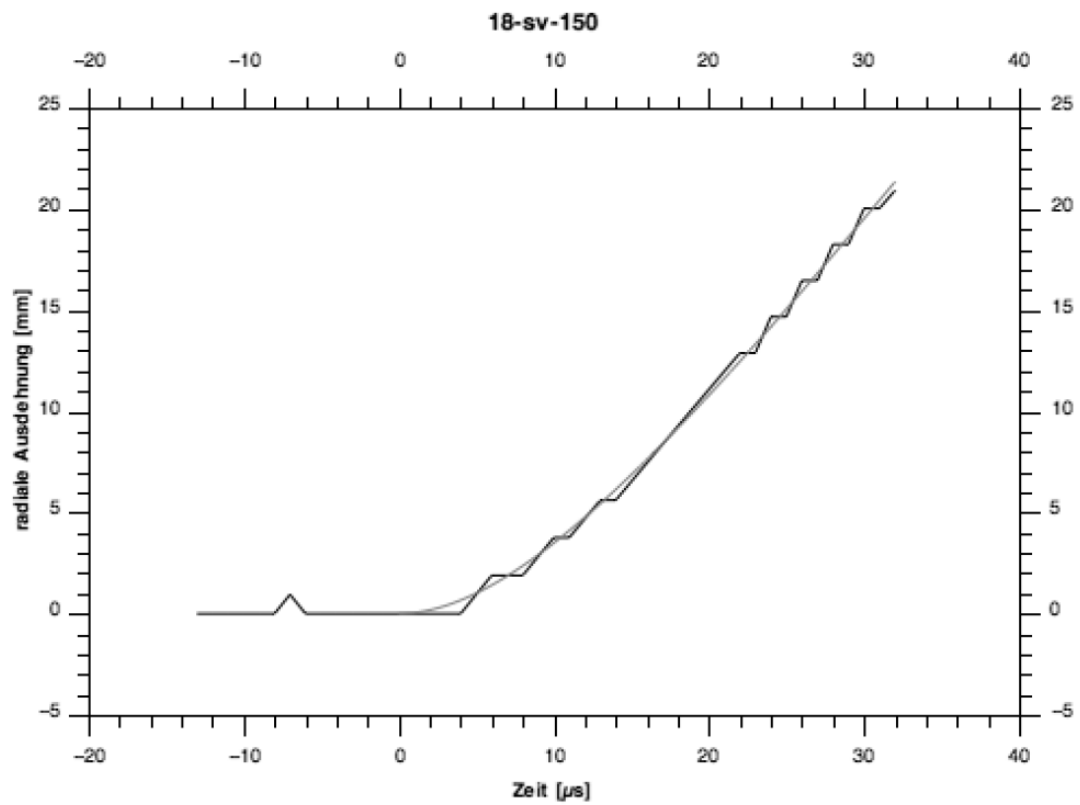


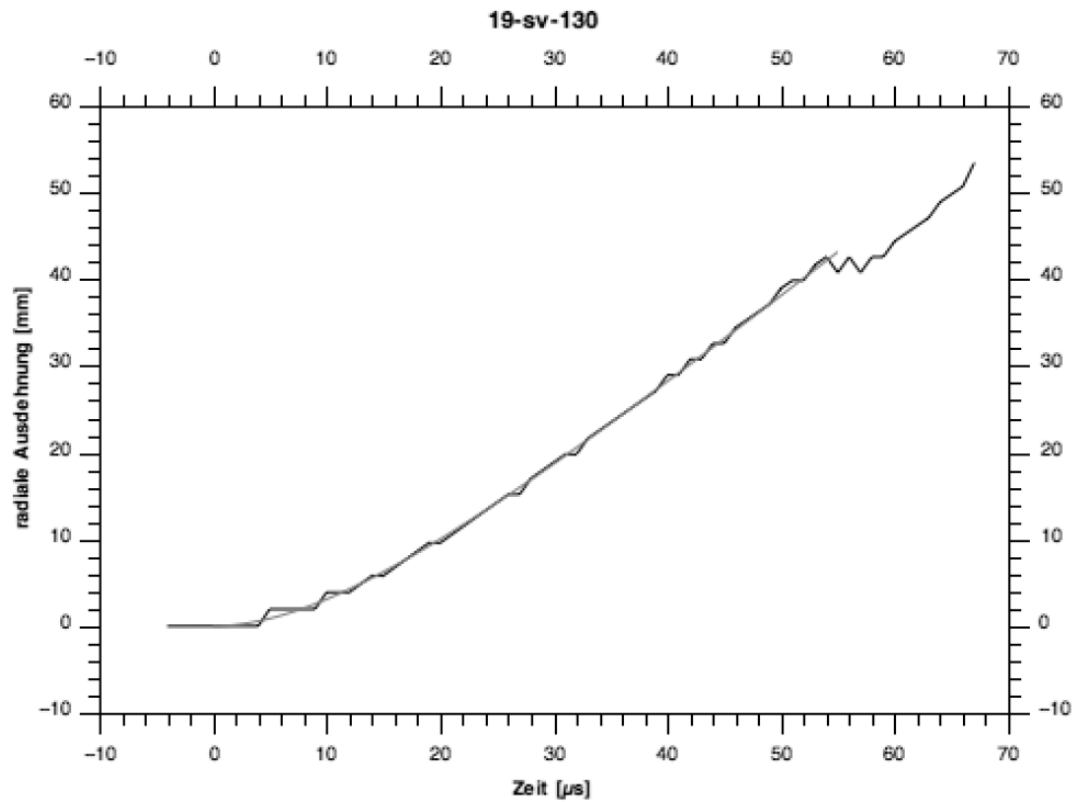
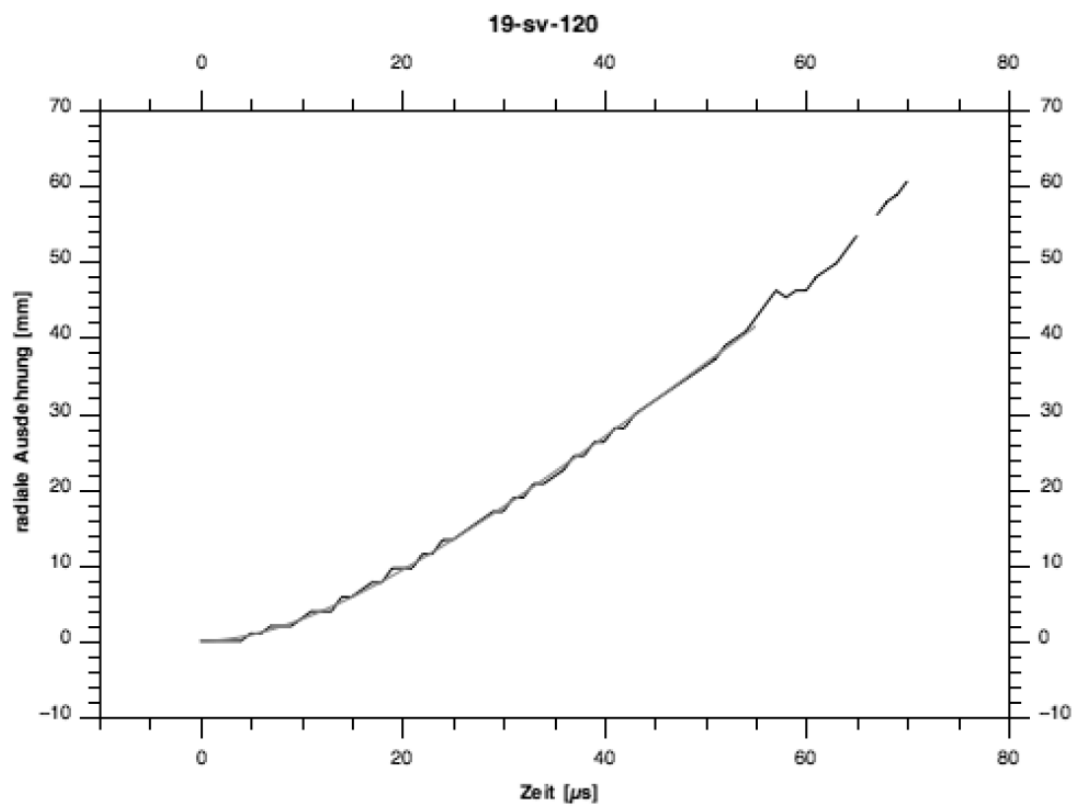


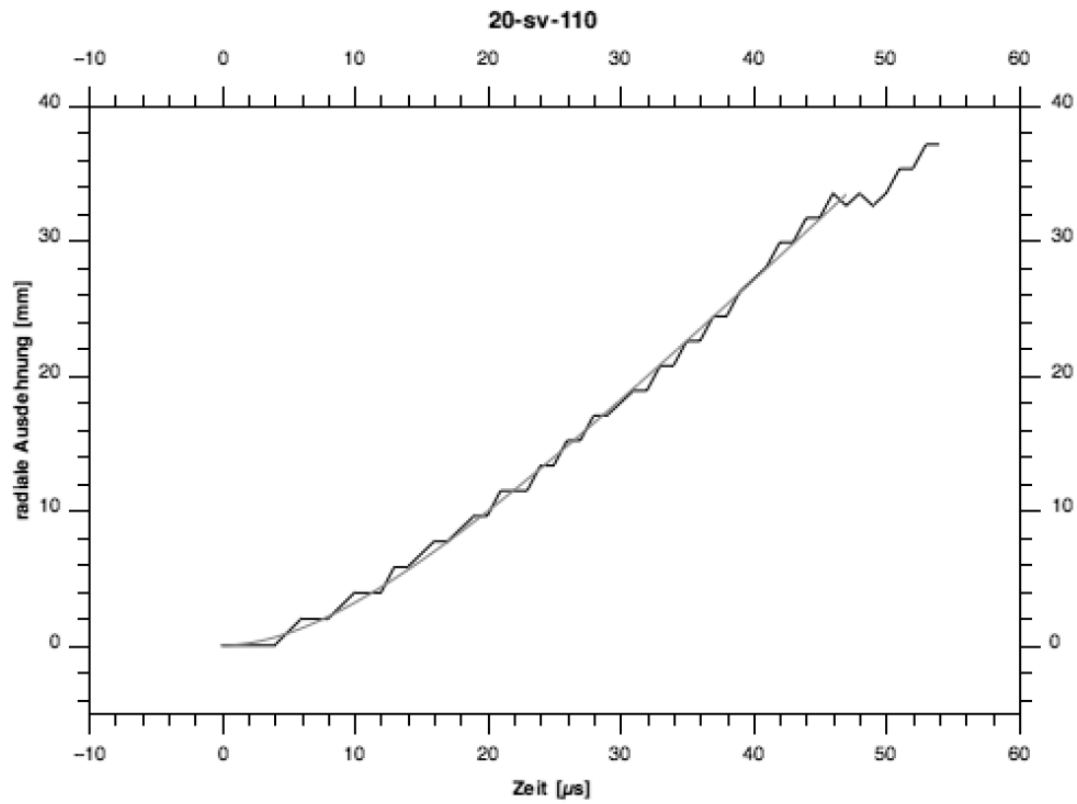
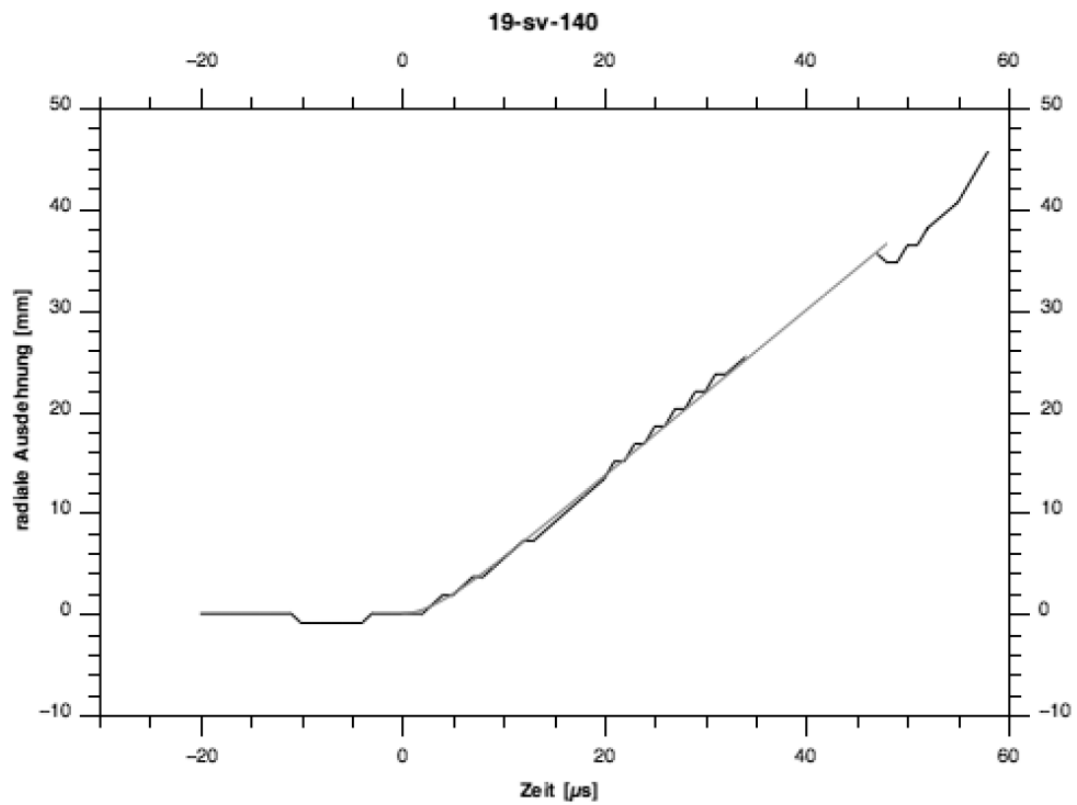


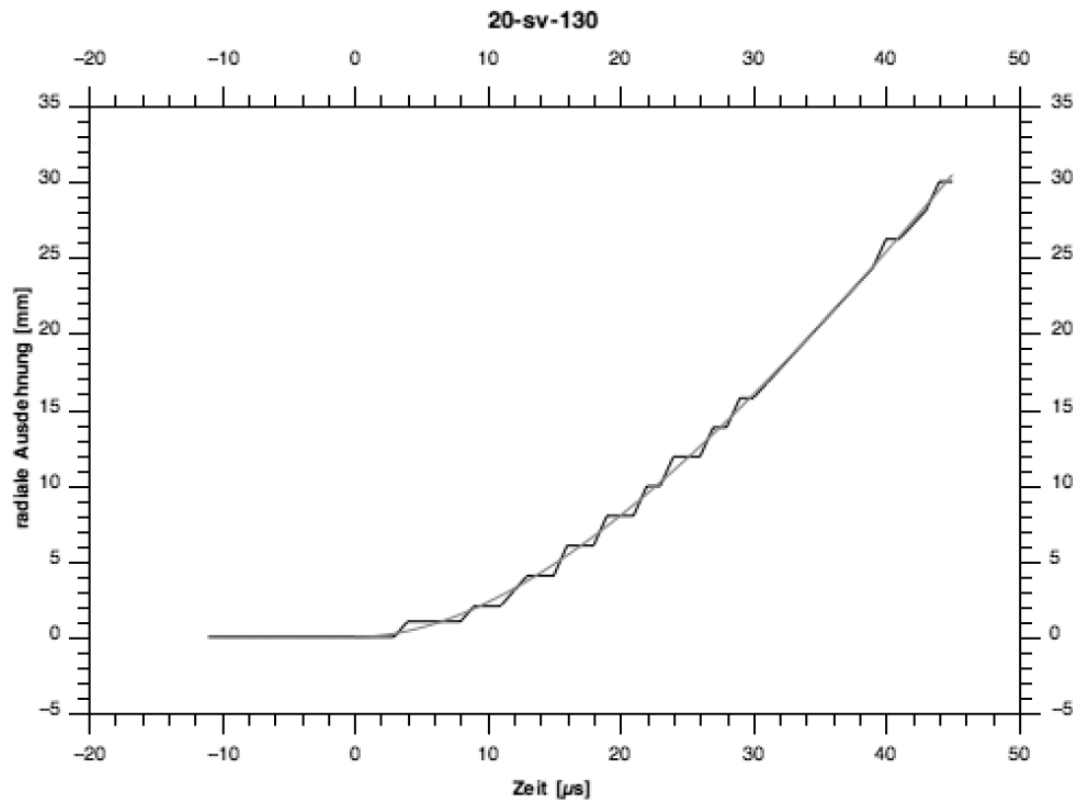
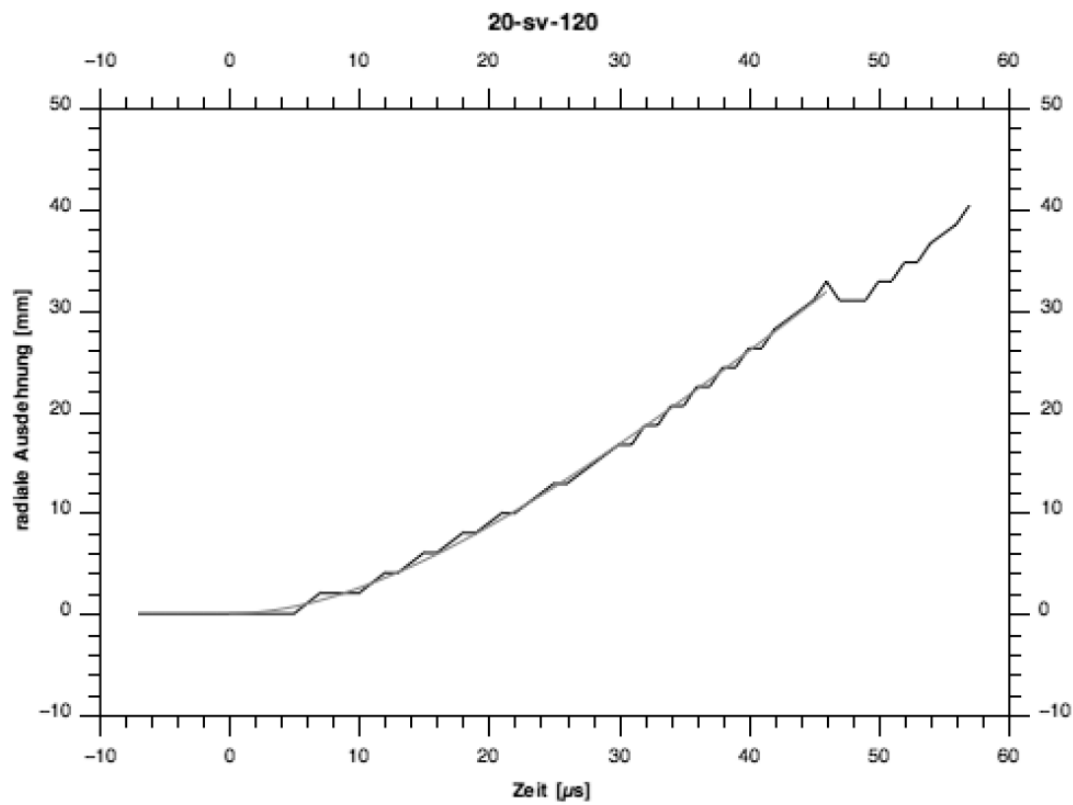


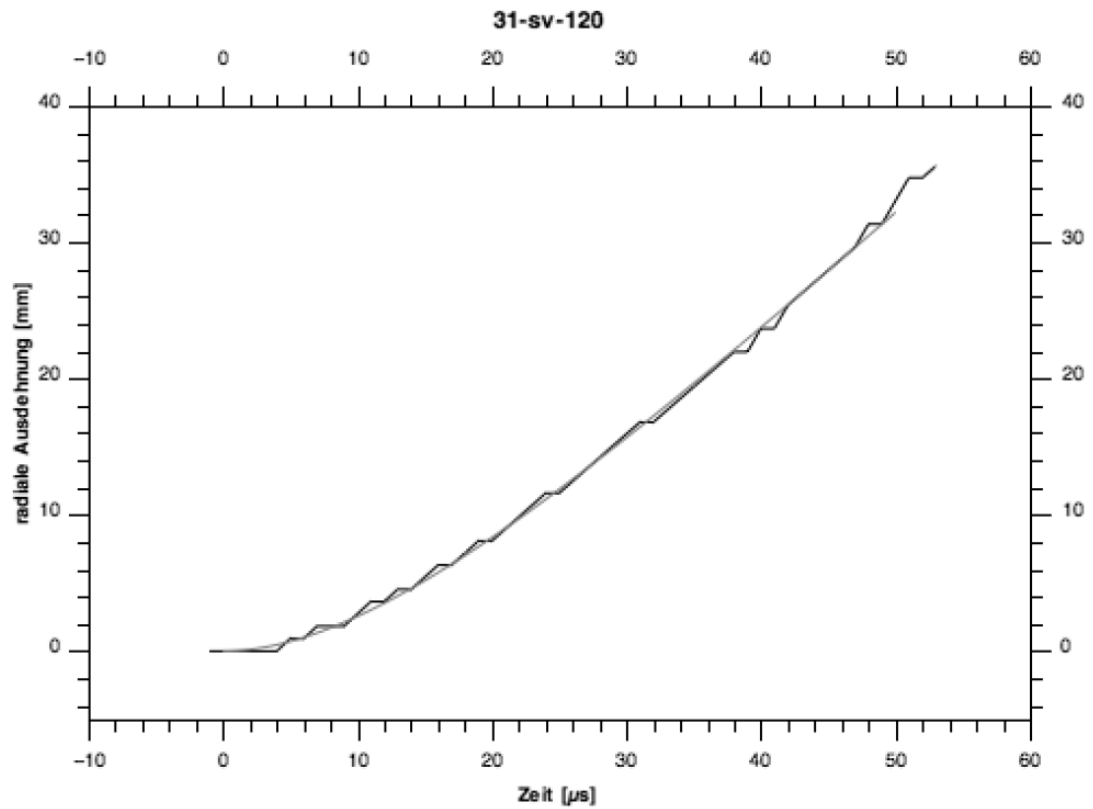
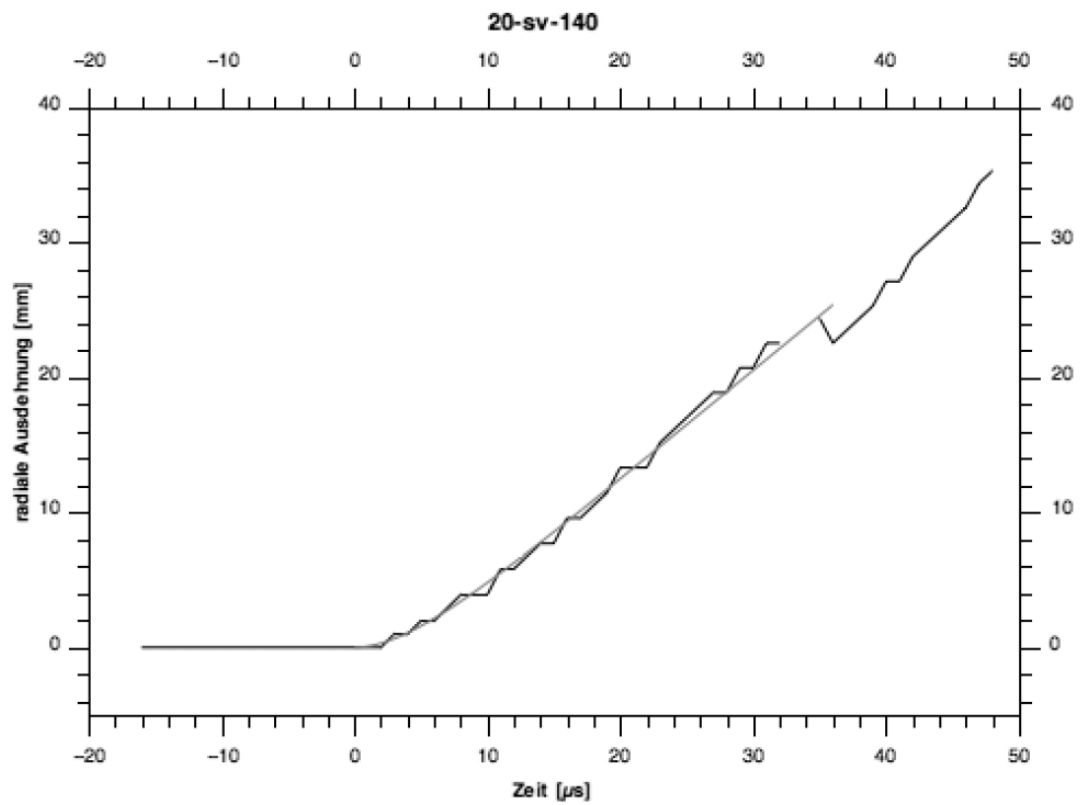


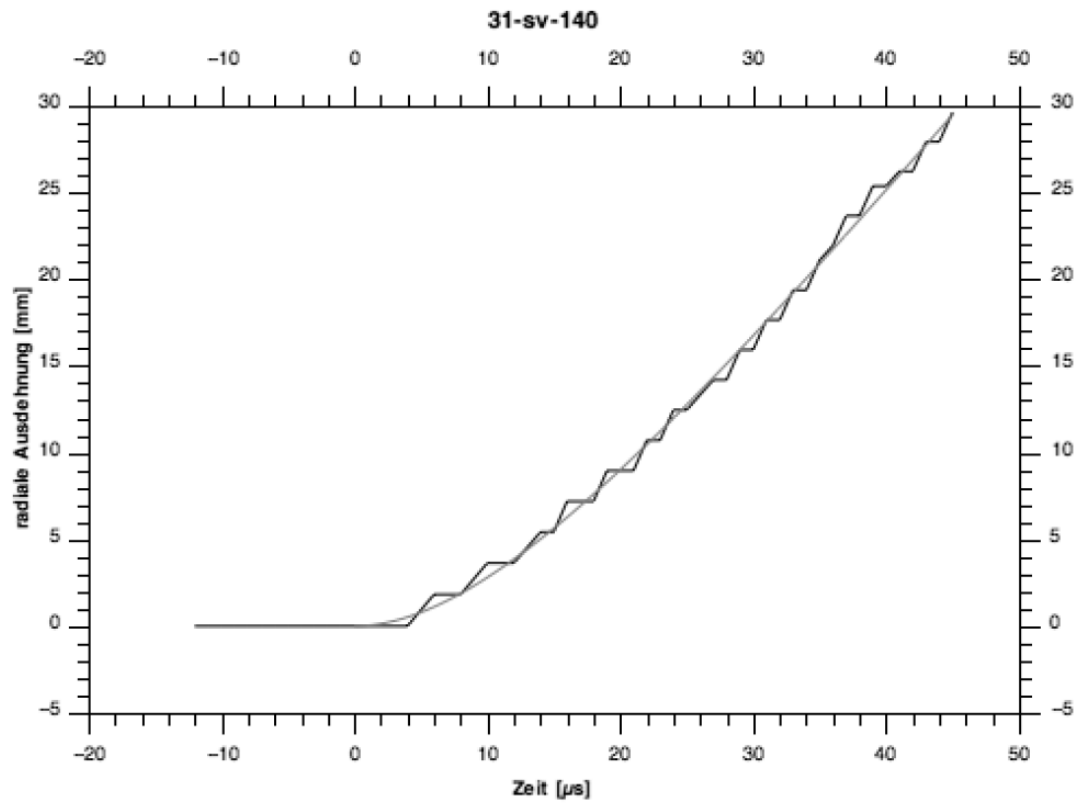
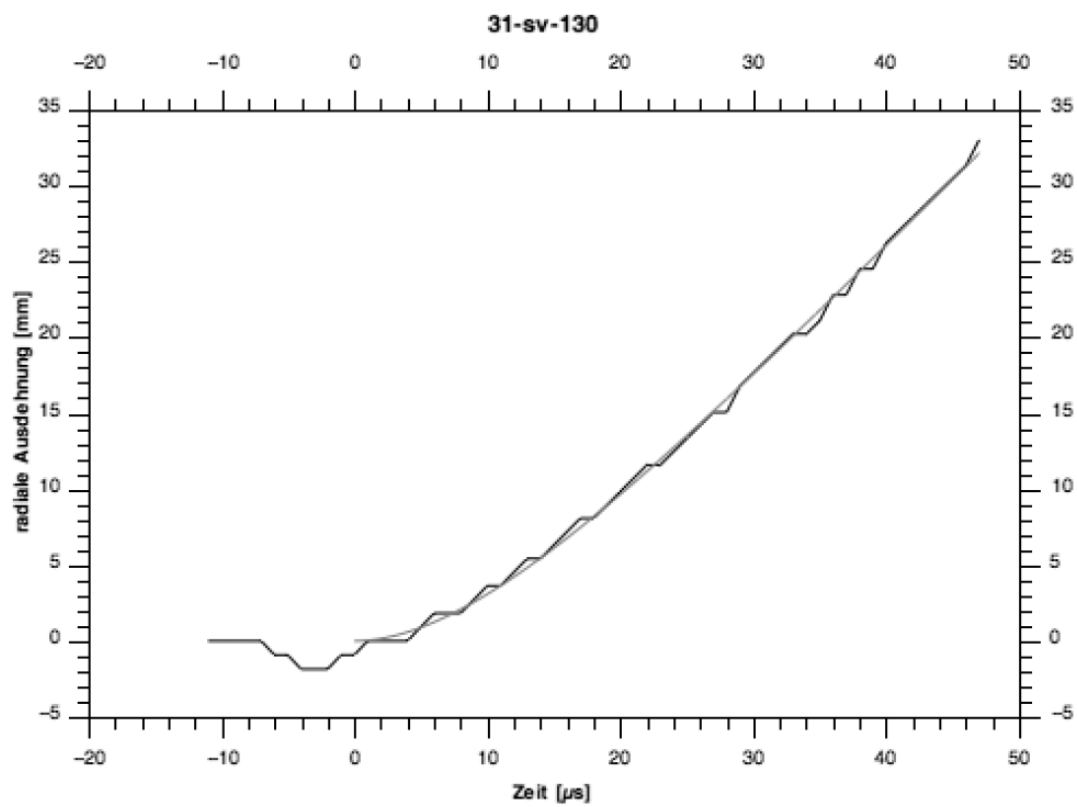












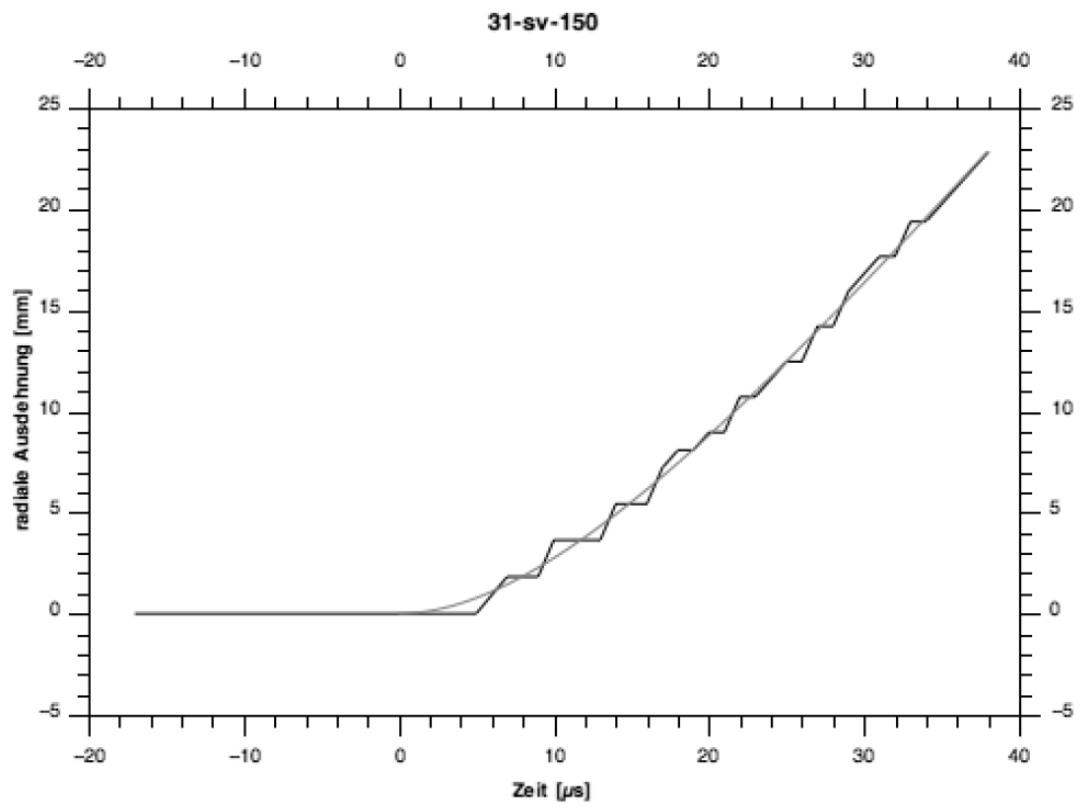
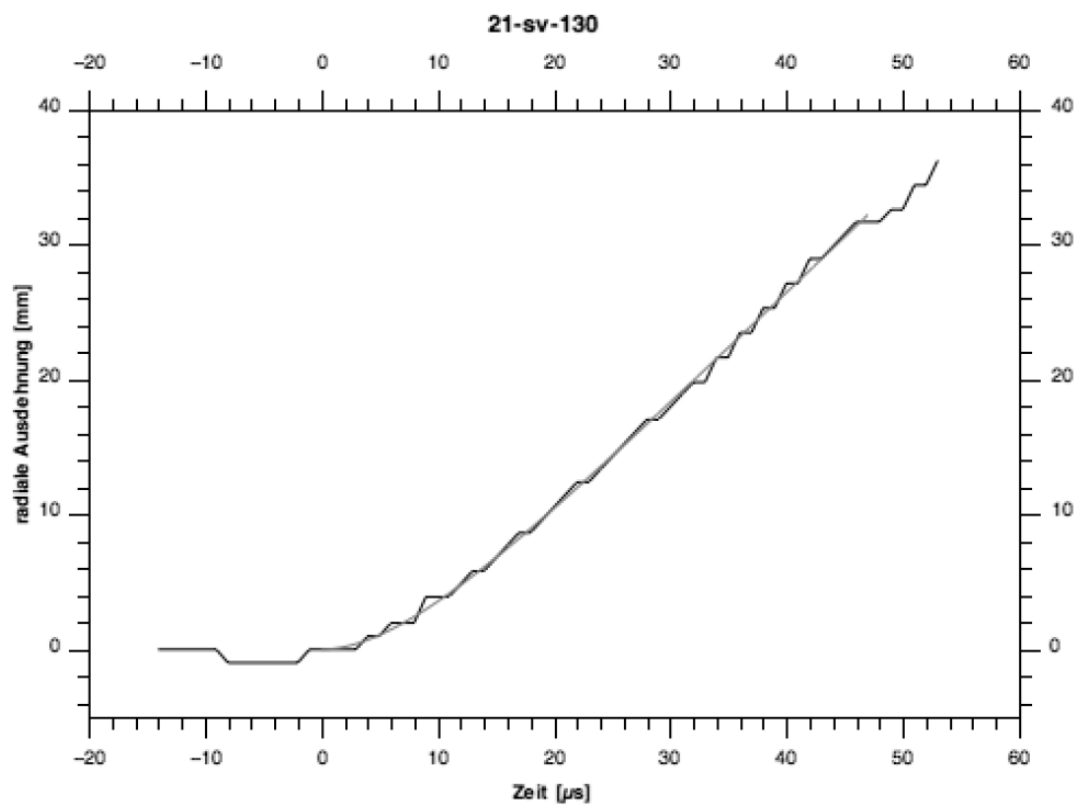
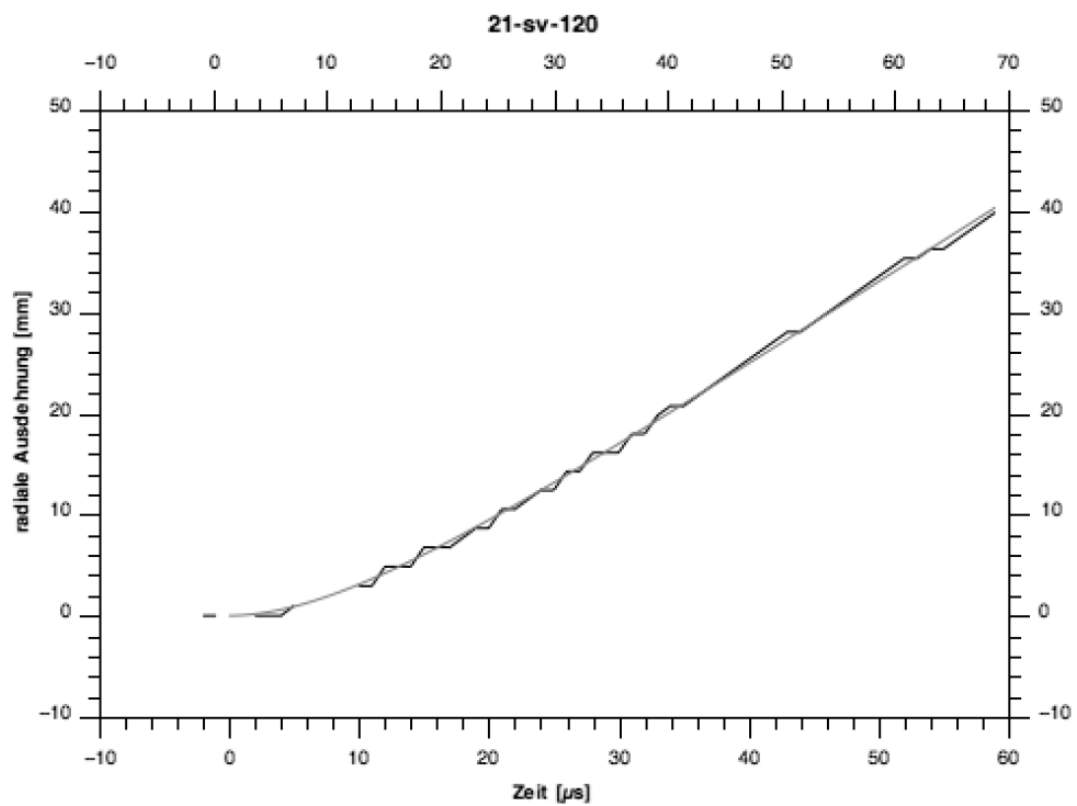
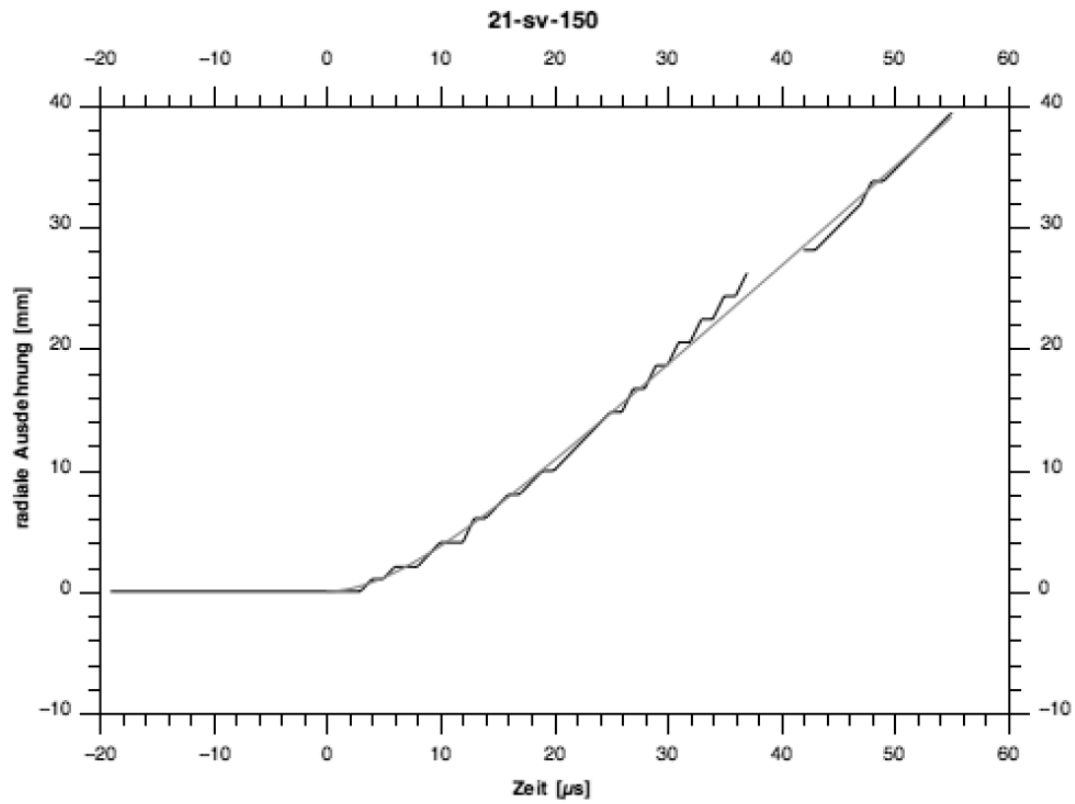
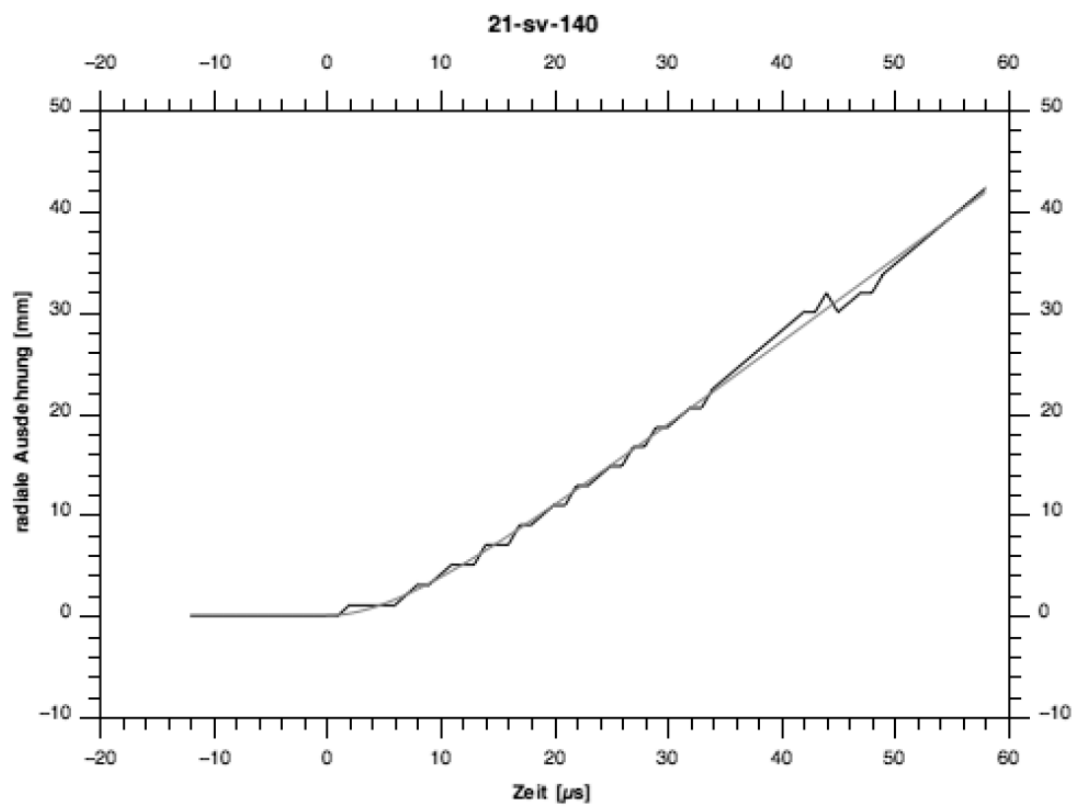


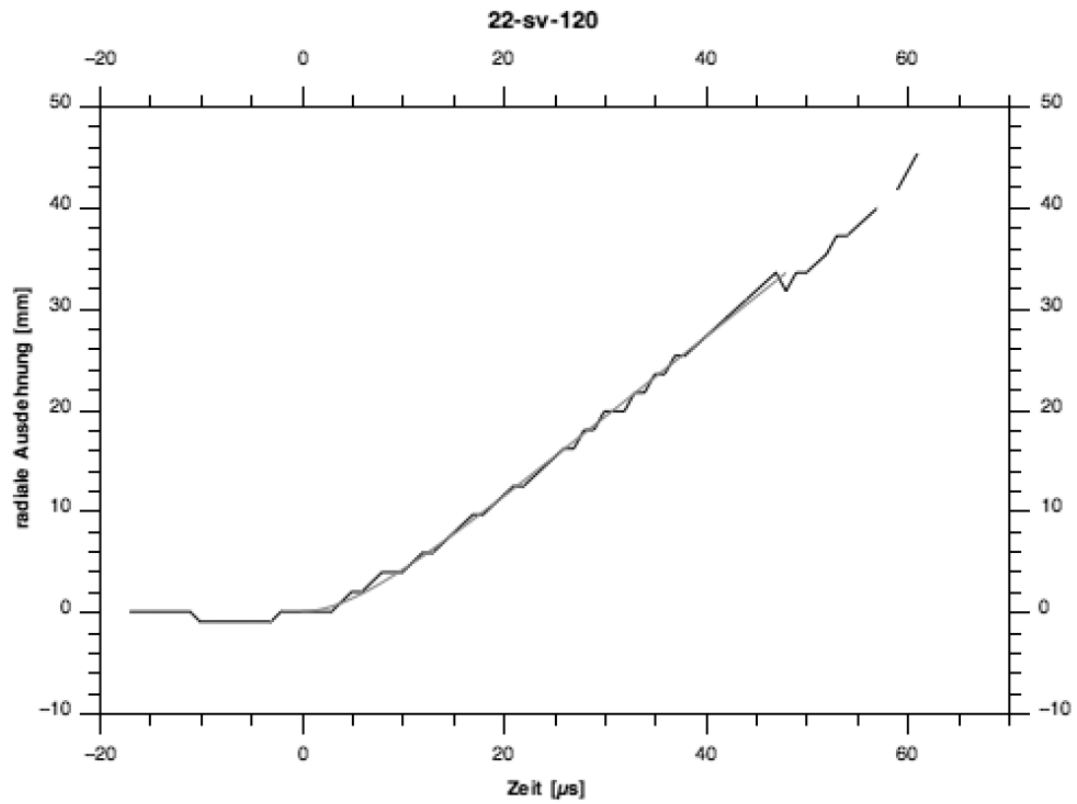
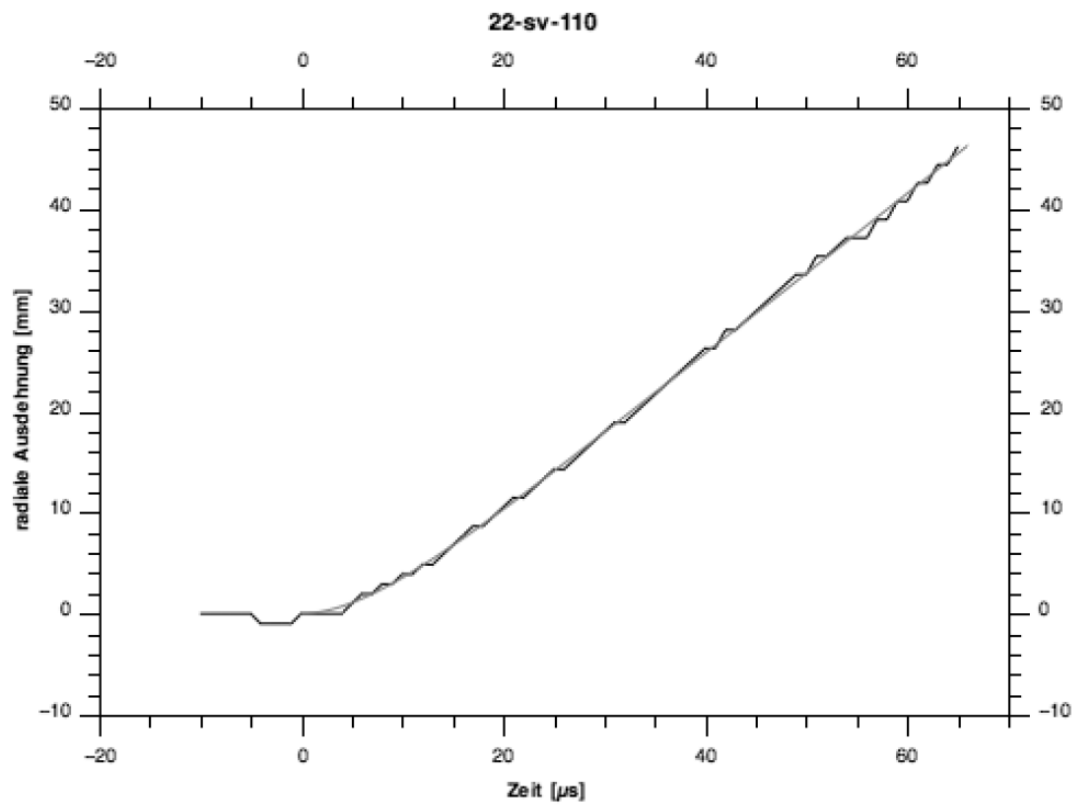
Tabelle 9.4: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Emulgit 42G"

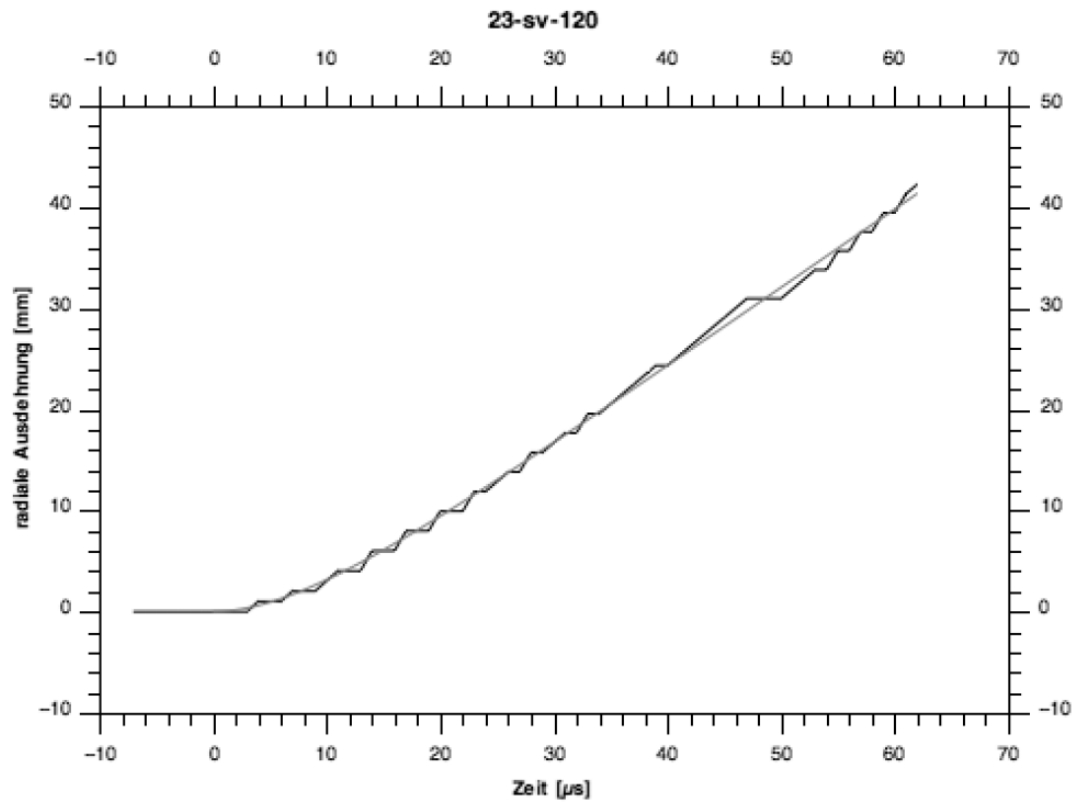
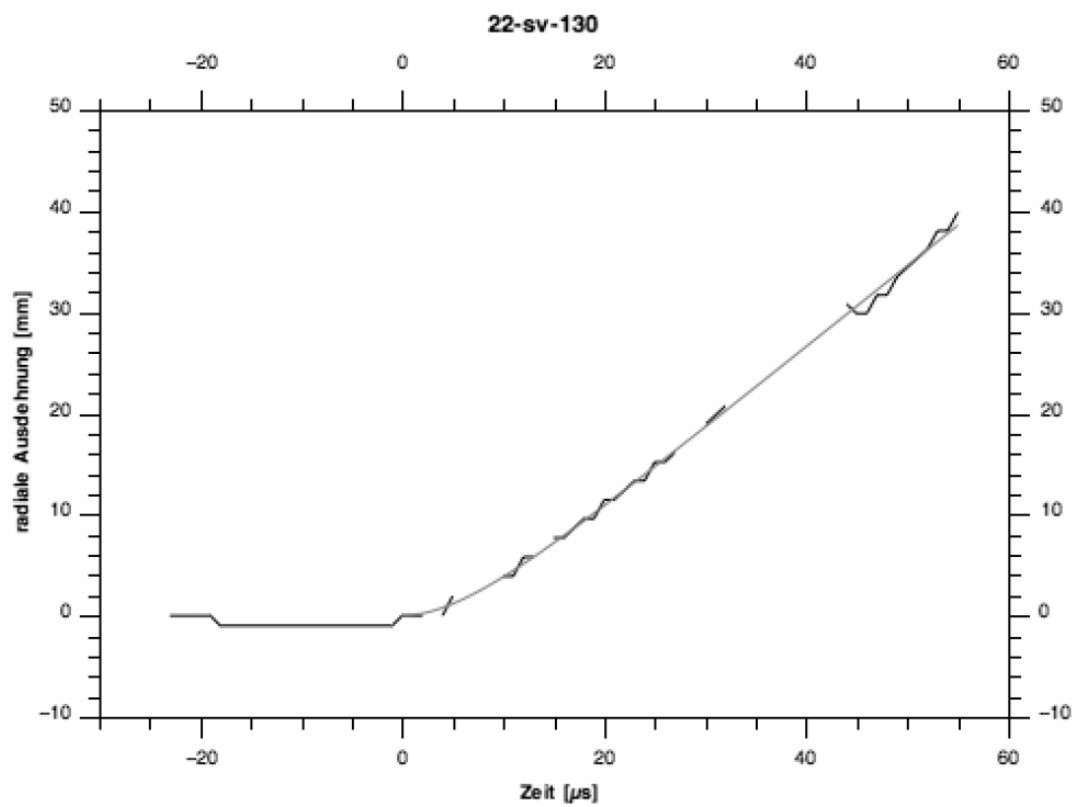
Rohrnr.	Auswertungsform (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter $\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/ μ s]	B_r [1/ μ s]
15	sv	80	0.64099	0.05515
		100	0.64705	0.15130
		120	0.64948	0.18892
16	sv	kein Film		
17	sv	110	0.94813	0.07883
		120	1.00426	0.06374
		130	0.93411	0.09356
		140	0.93695	0.12261
18	sv	120	1.08874	0.09681
		130	1.07364	0.09971
		140	0.96170	0.15035
		150	0.95695	0.09876
19	sv	110	0.94391	0.10575
		120	1.01219	0.06989
		130	1.02193	0.07714
		140	0.82089	0.29092
20	sv	110	0.92924	0.08929
		120	1.07069	0.05690
		130	1.21757	0.04279
		140	0.80825	0.21810
31	sv	120	0.87632	0.07331
		130	0.88253	0.09331
		140	0.89581	0.08052
		150	0.87086	0.08128

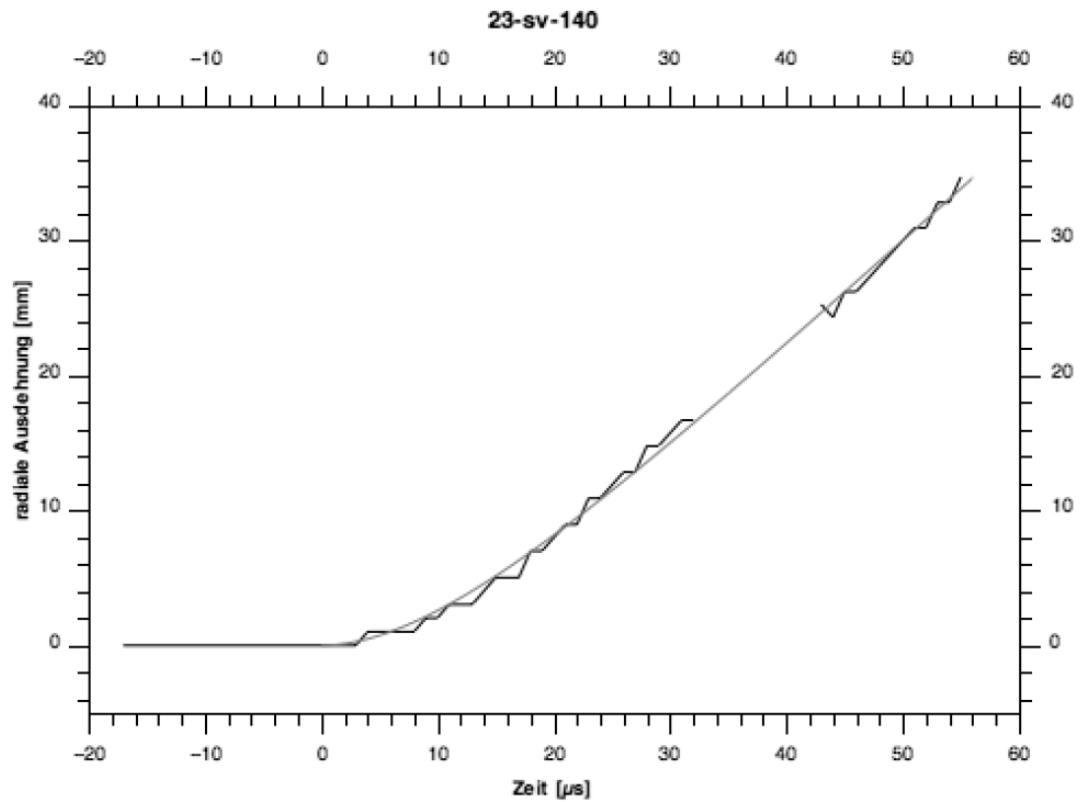
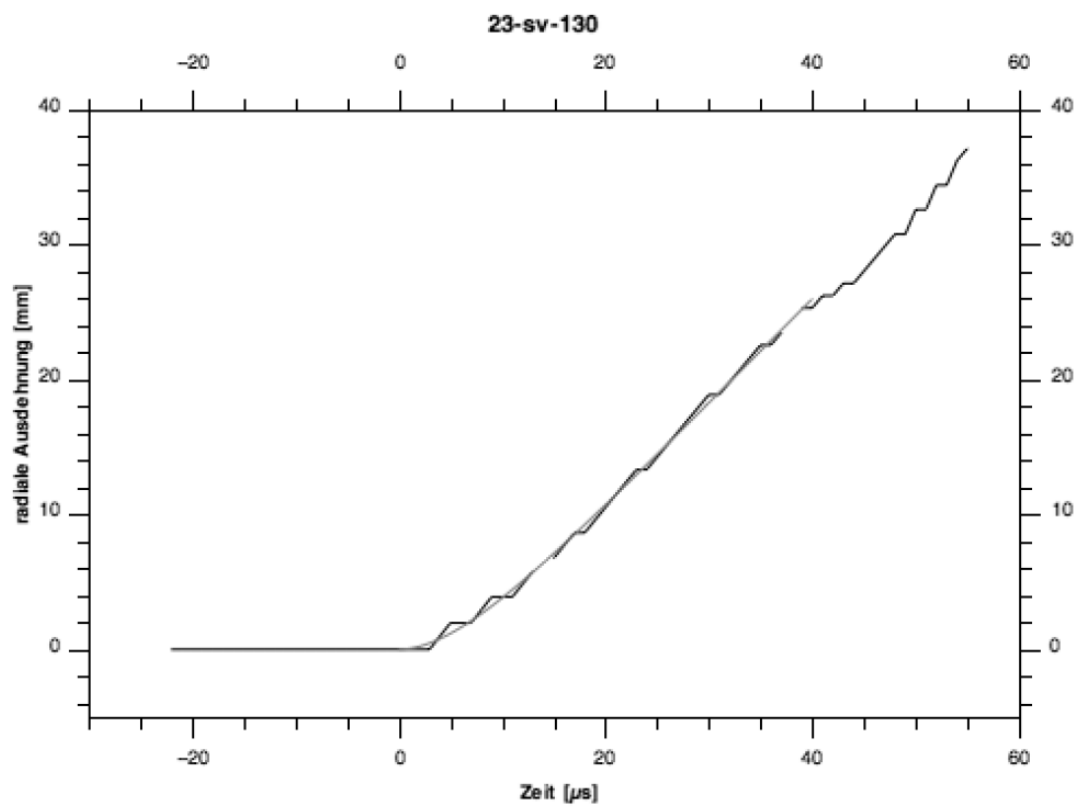
9.2.4. "Emu", chemical gasing, BAM

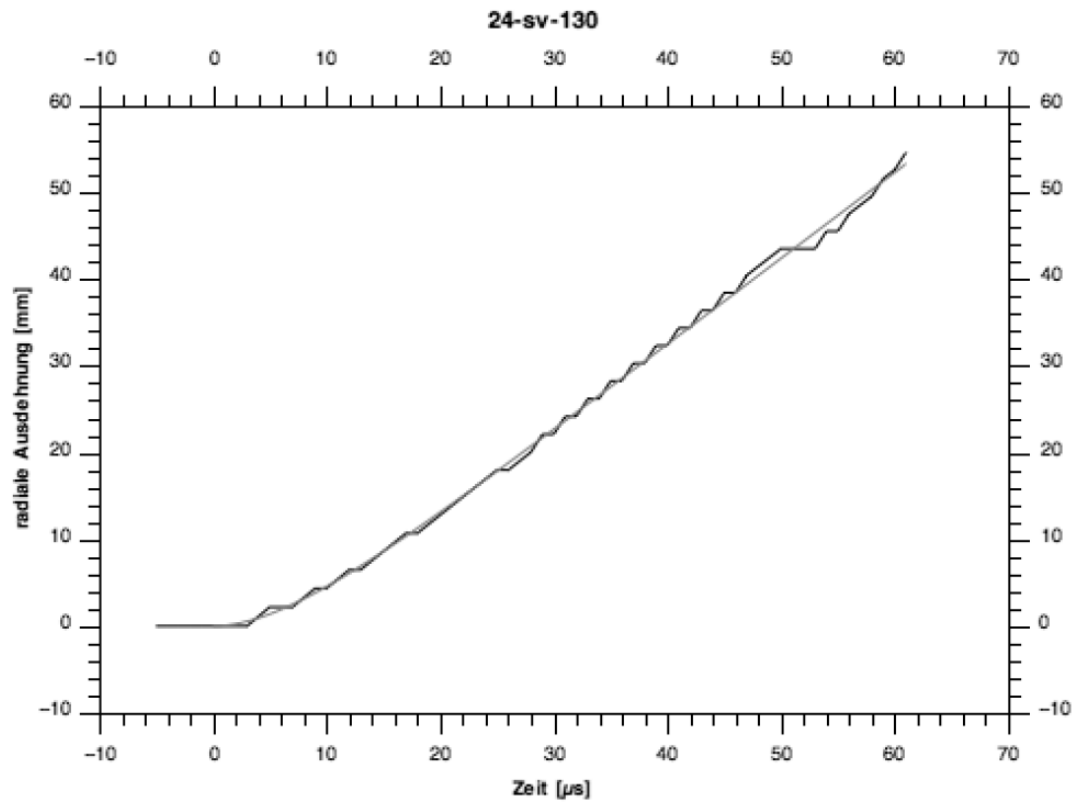
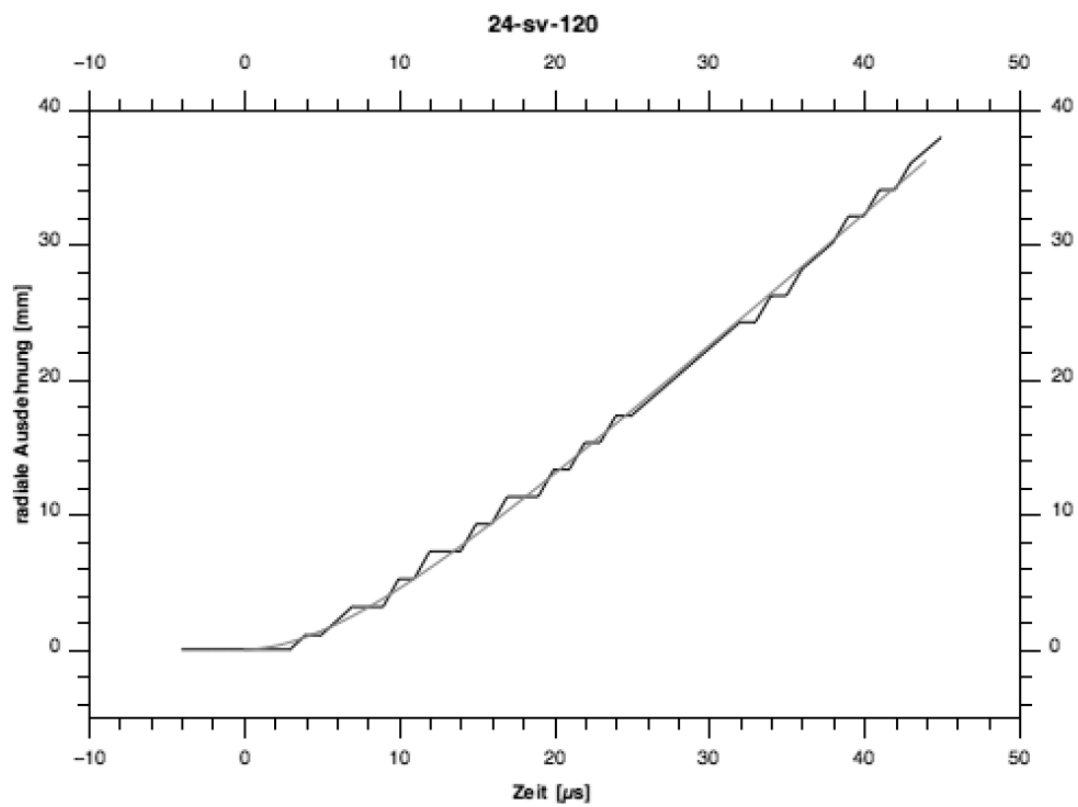


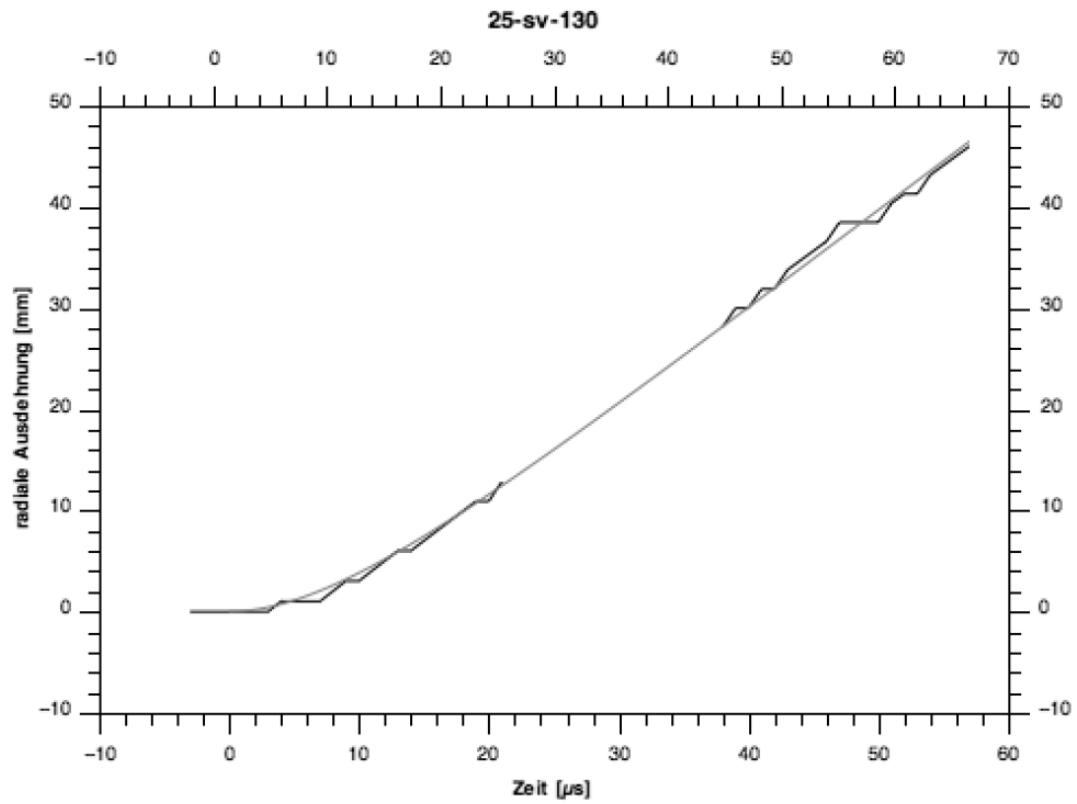
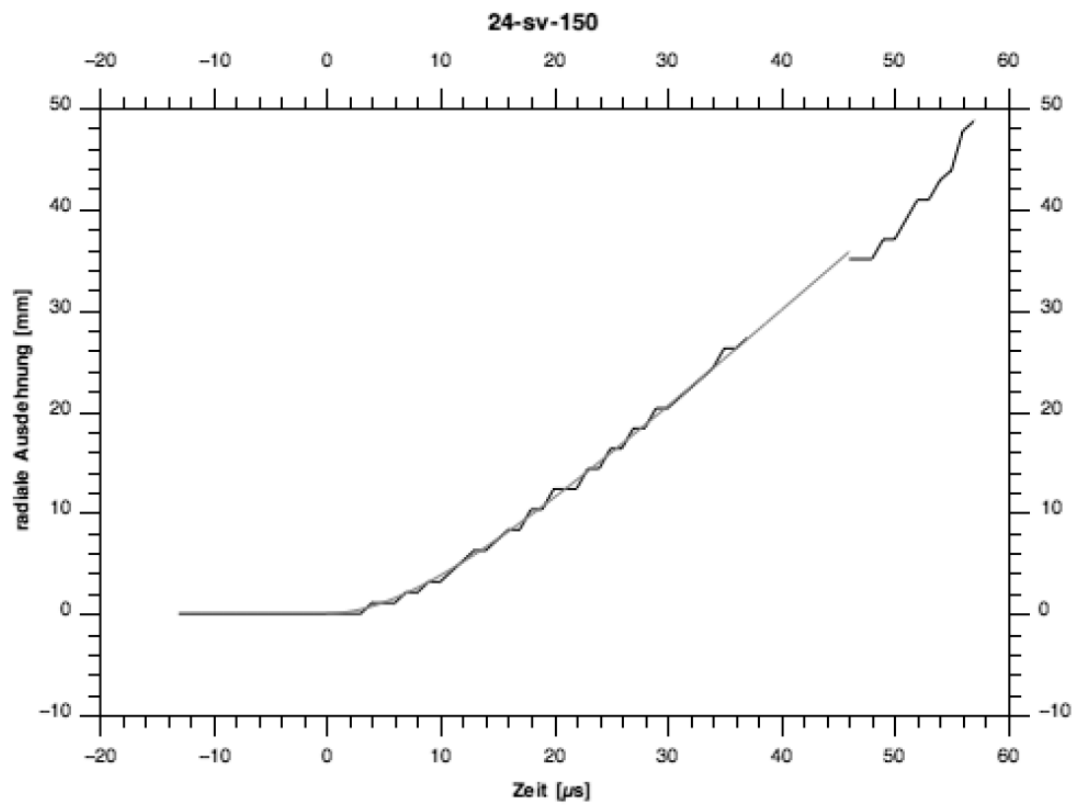


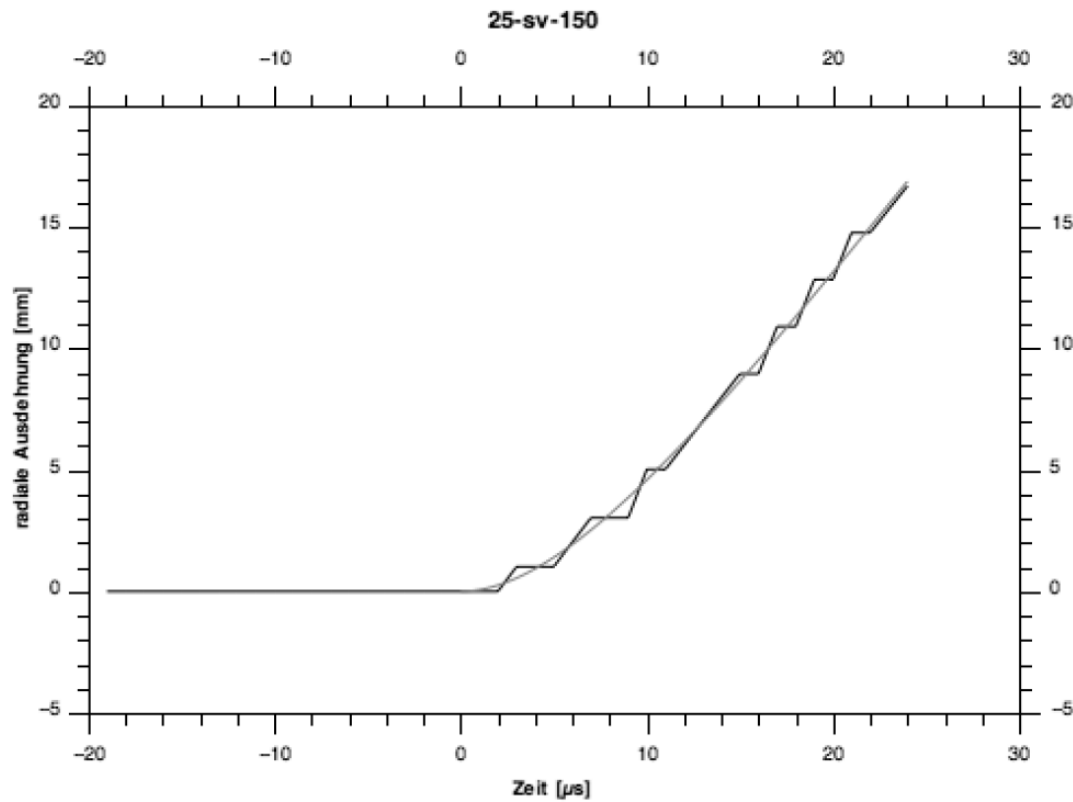
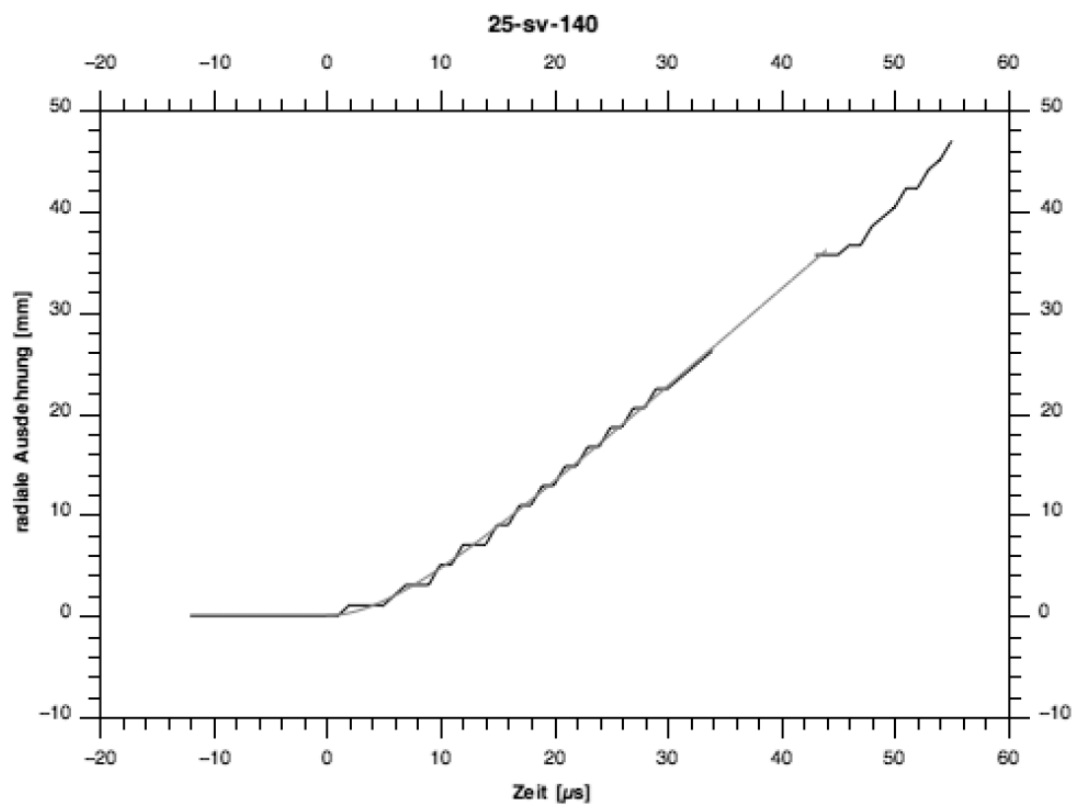


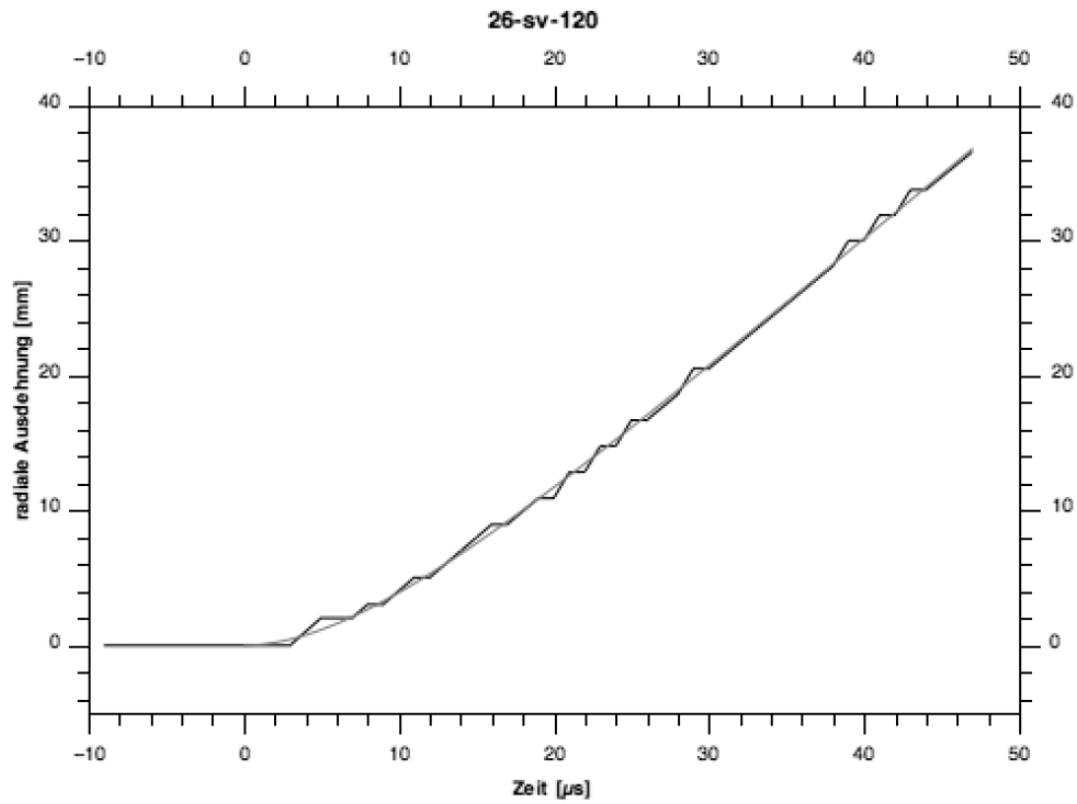
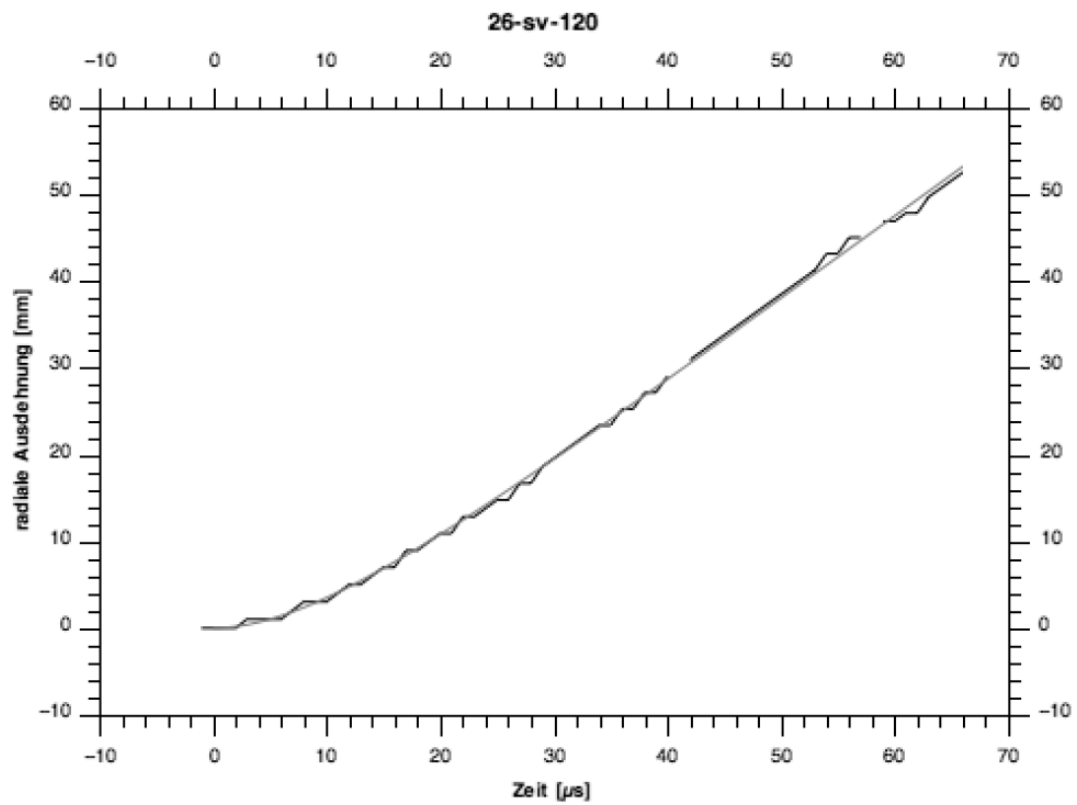


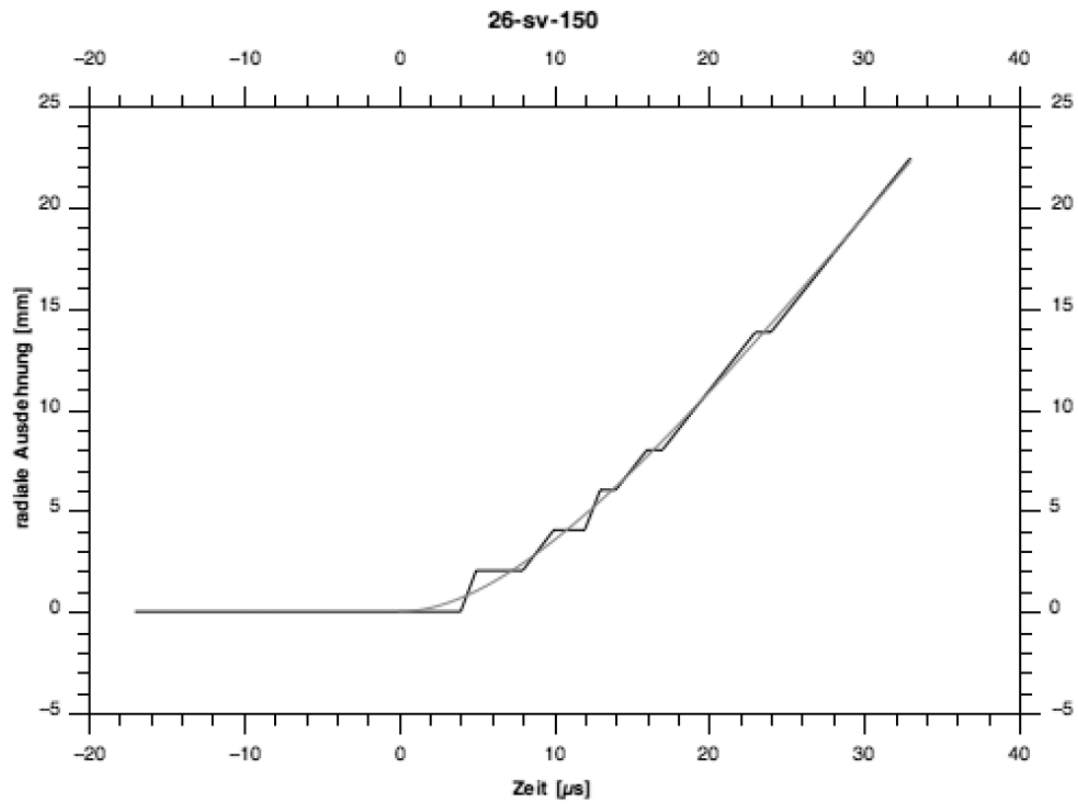
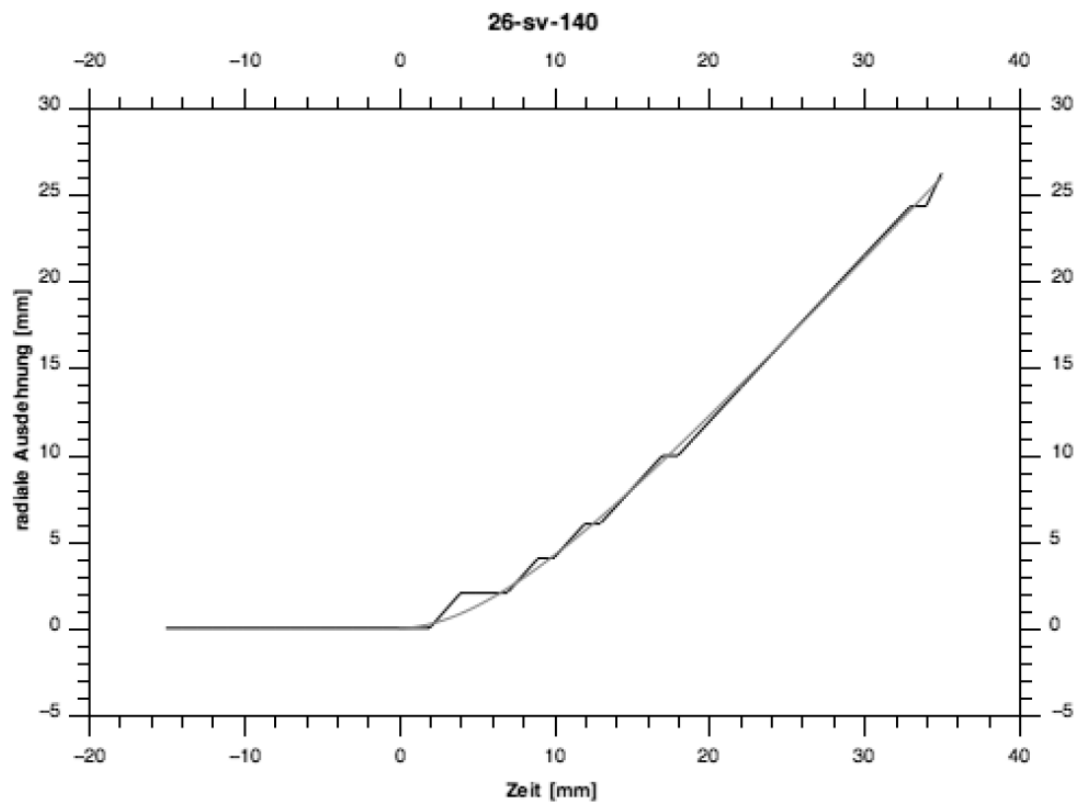


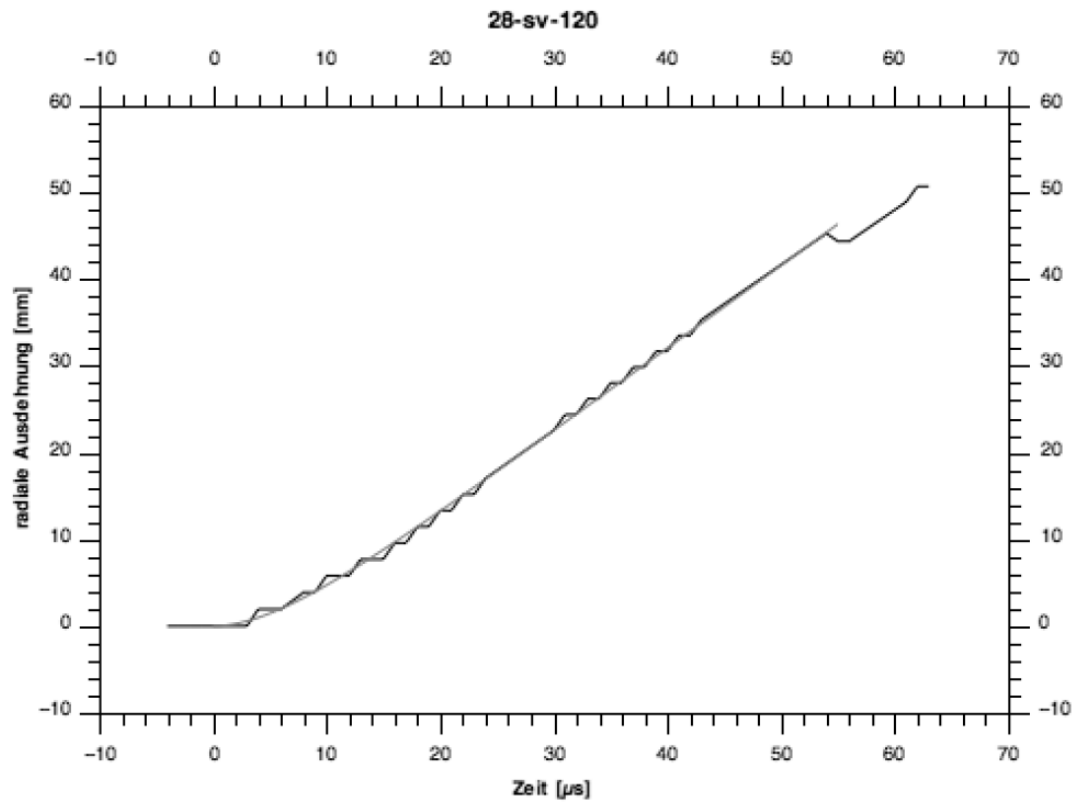
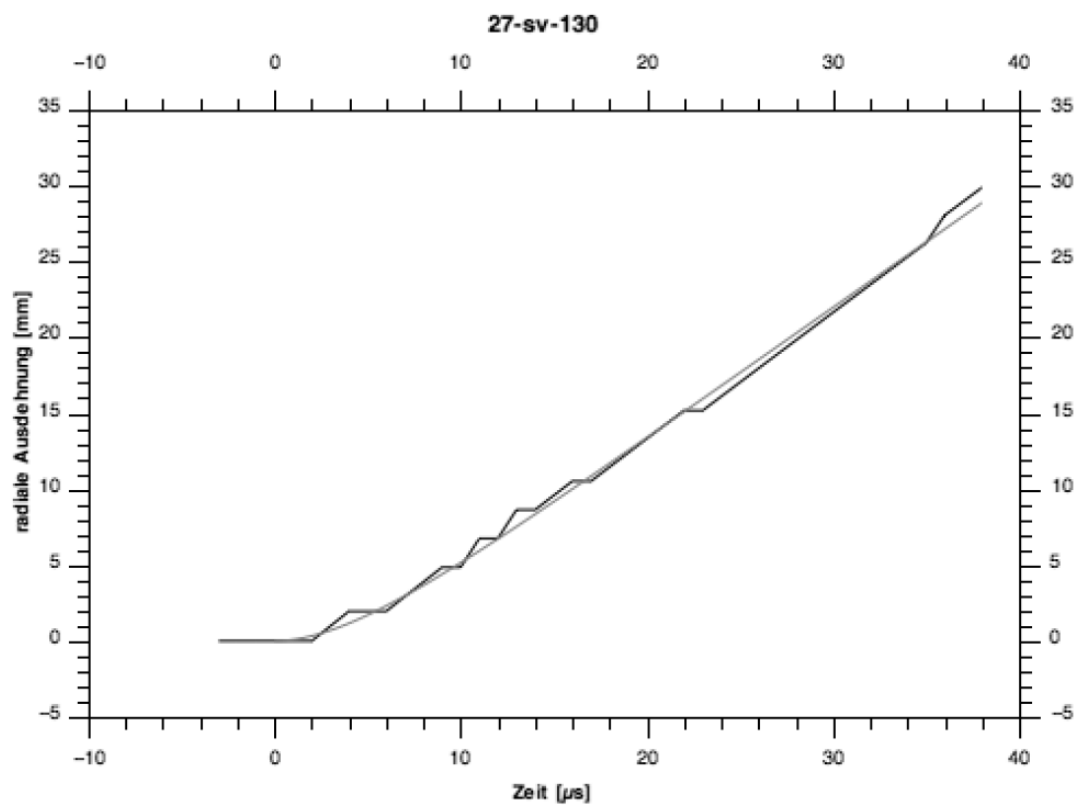


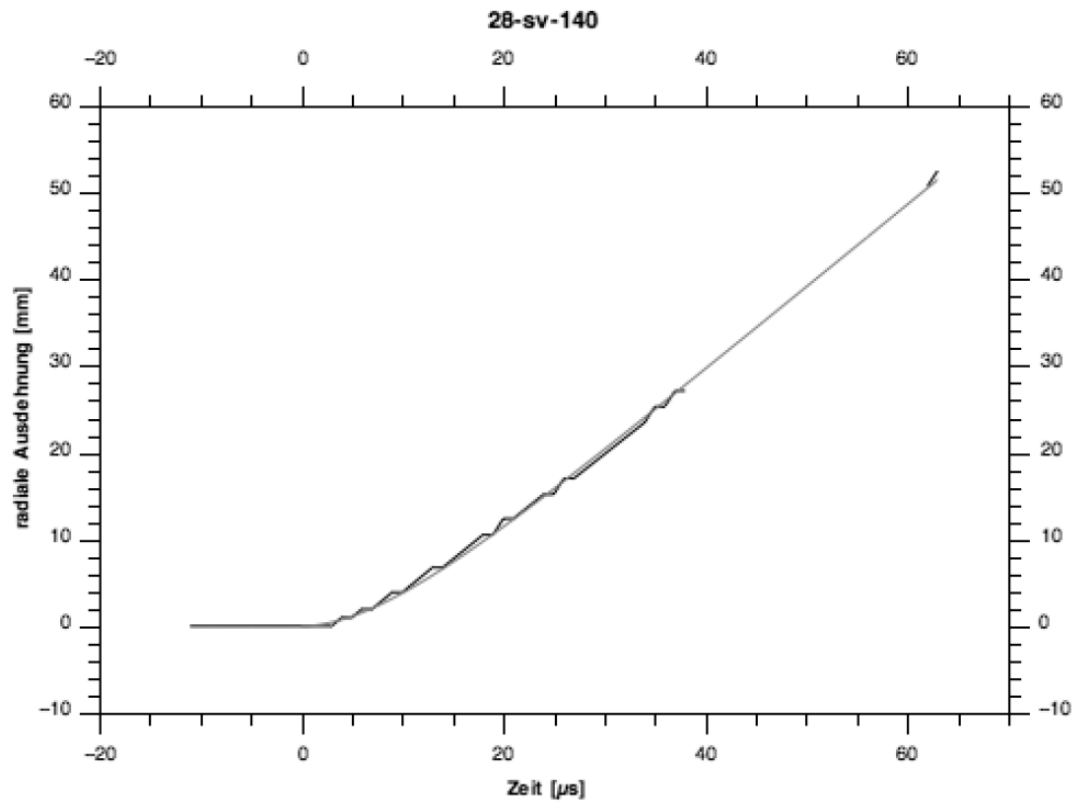
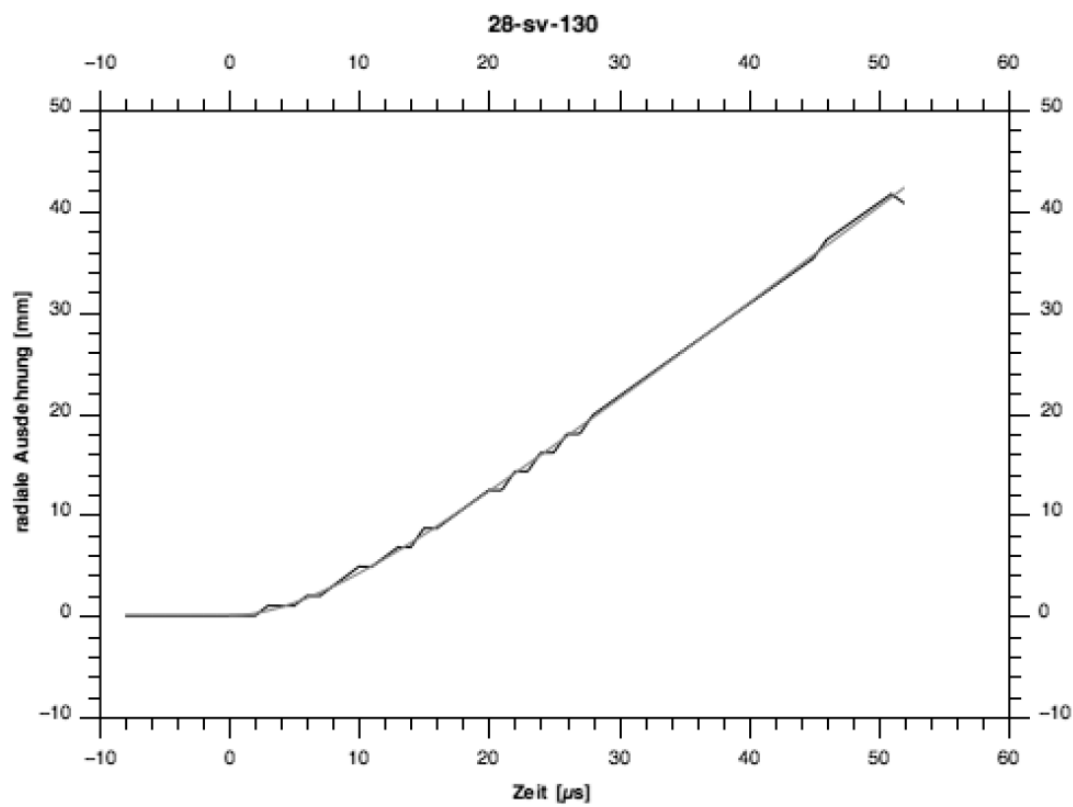


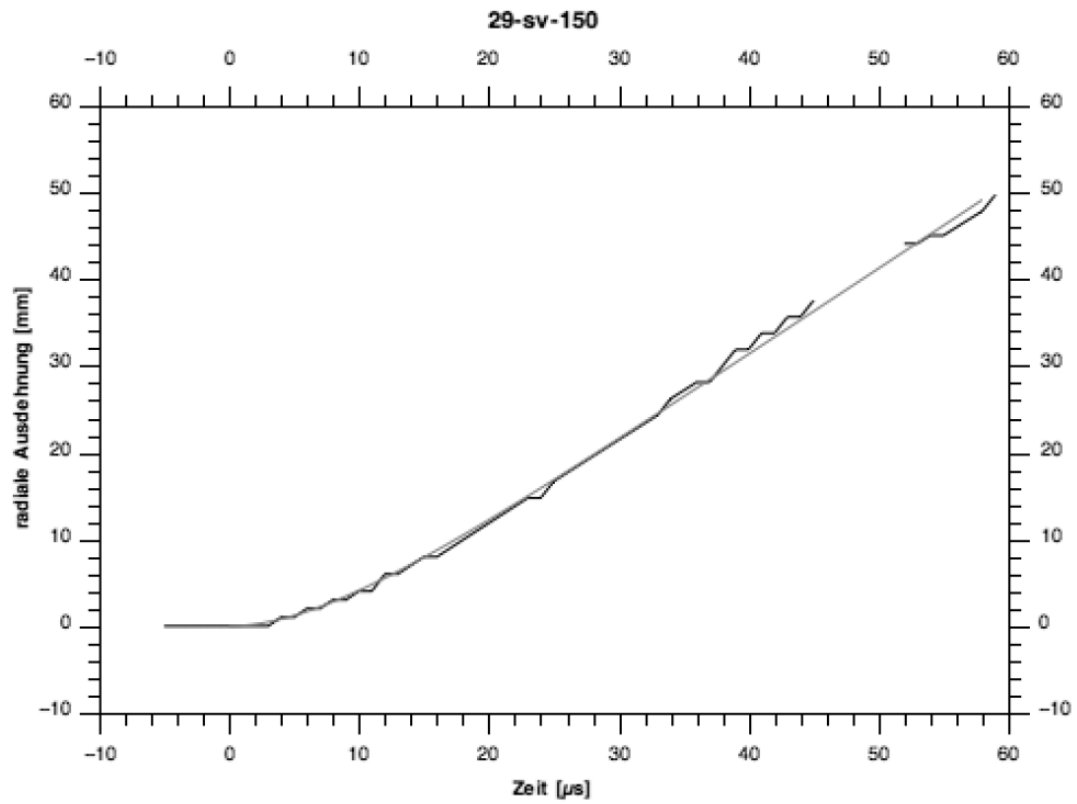
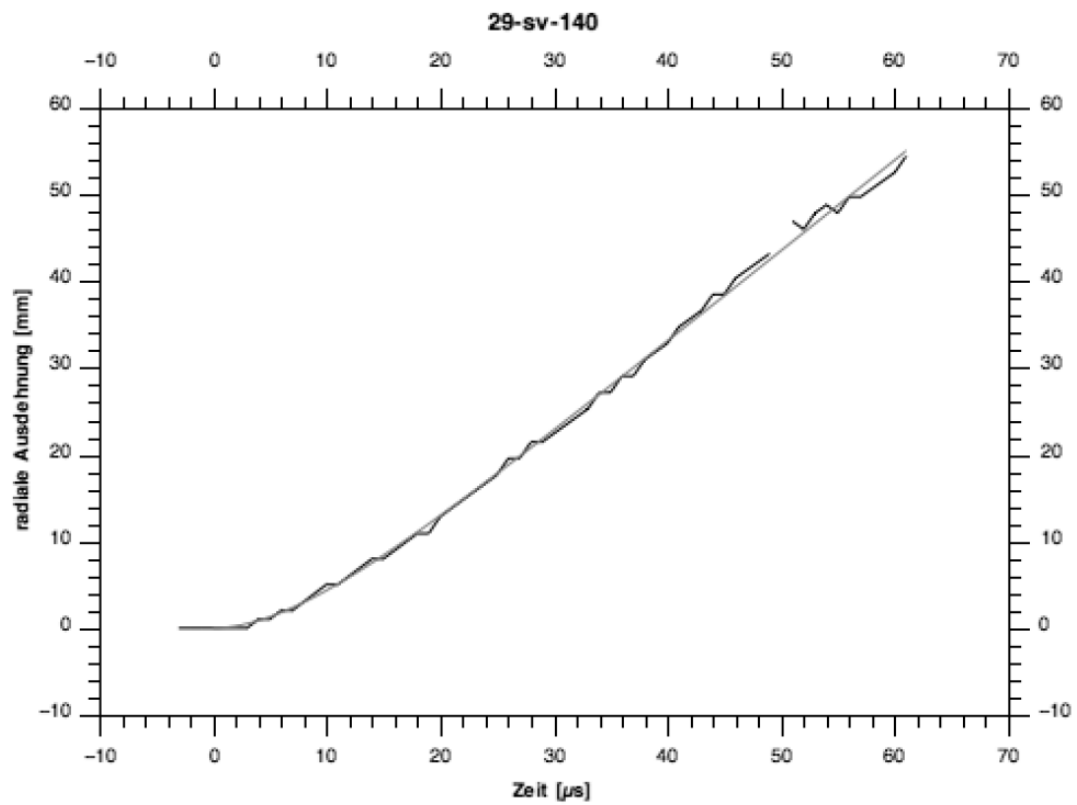


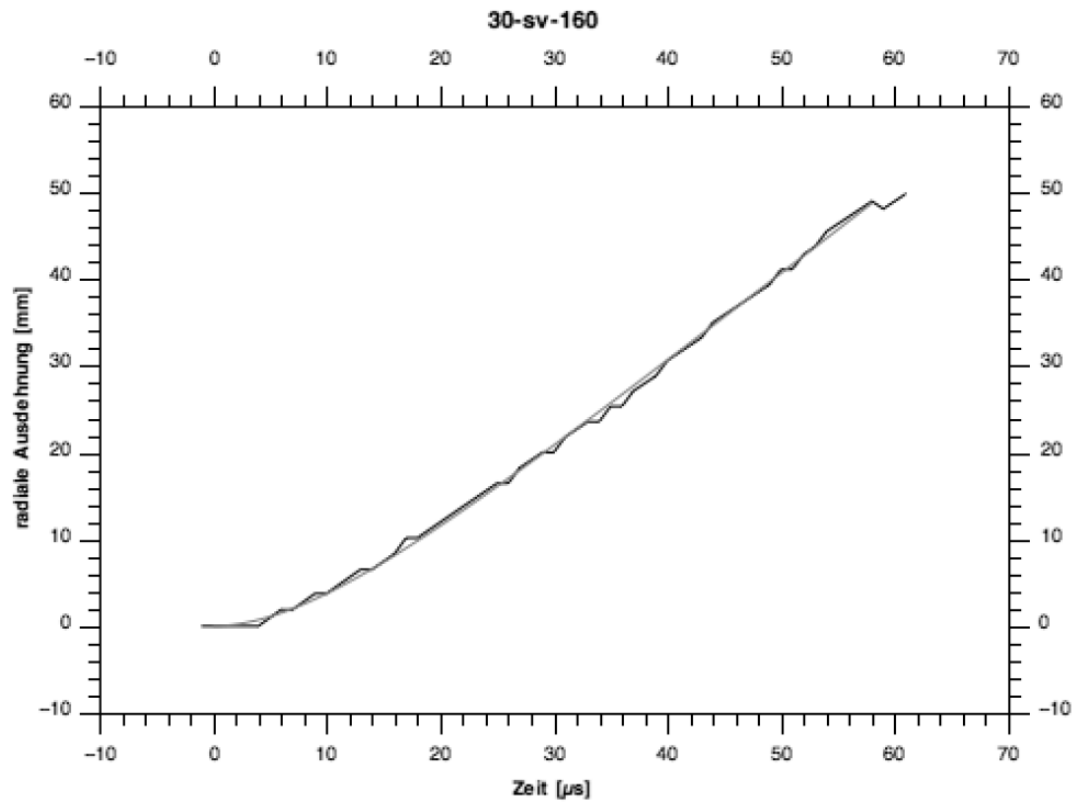
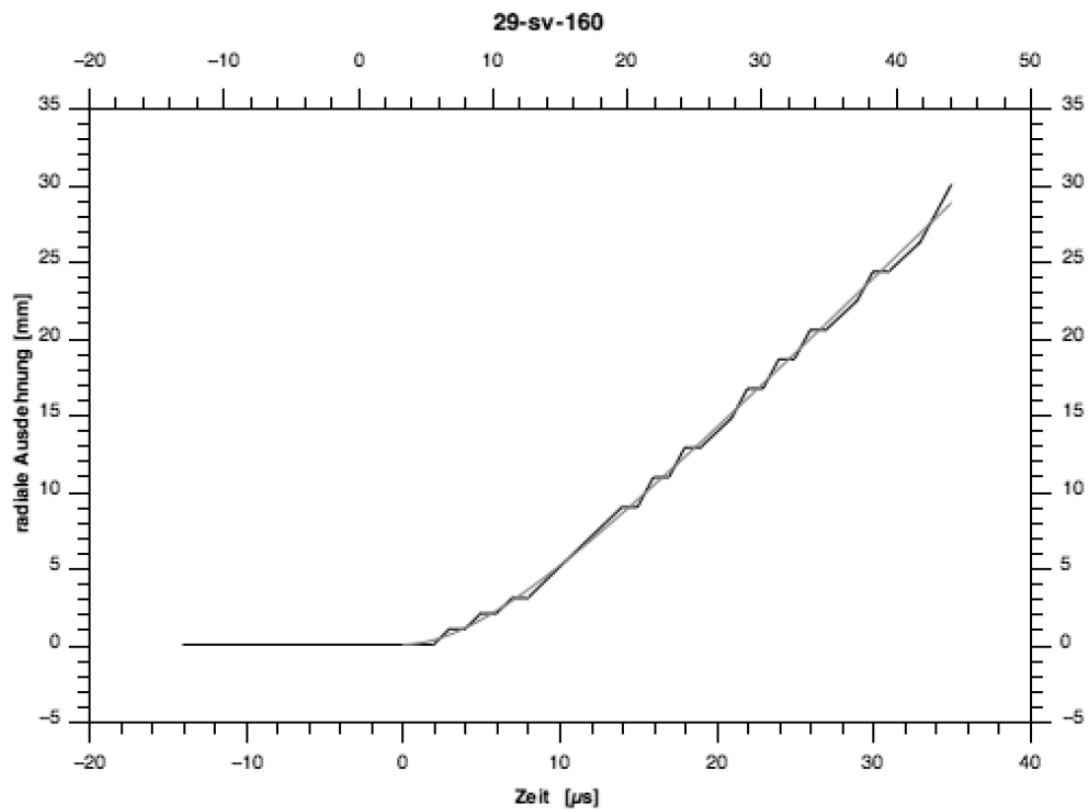


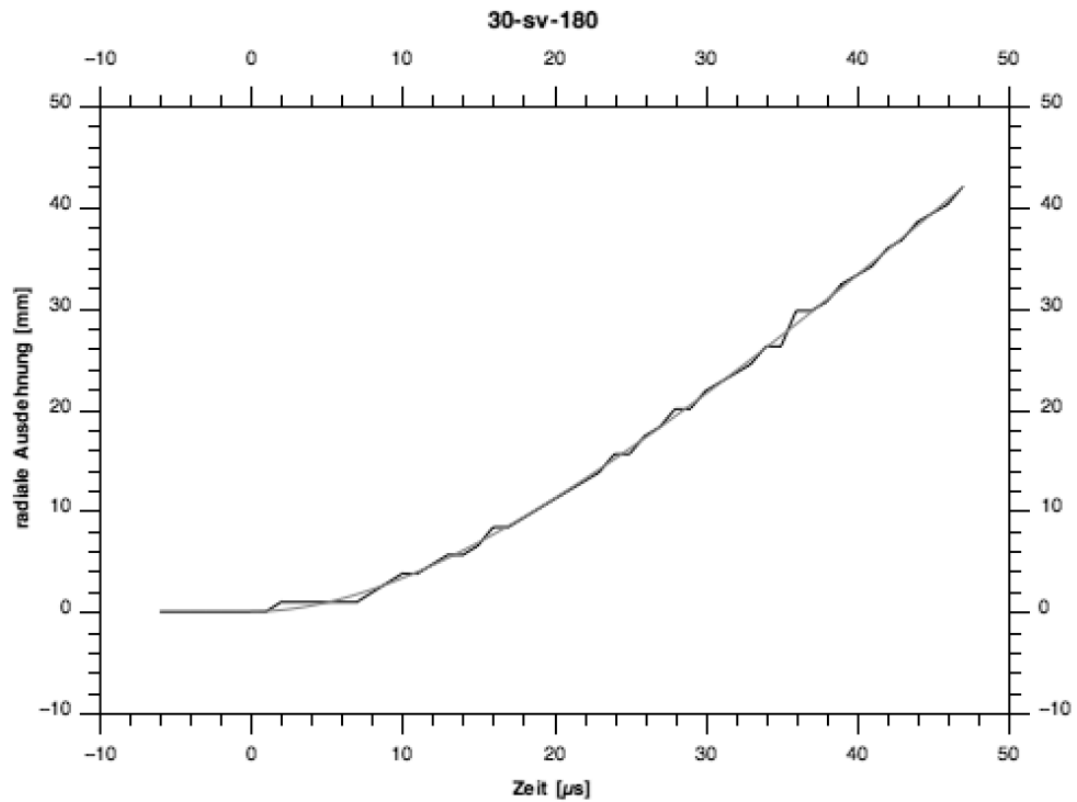
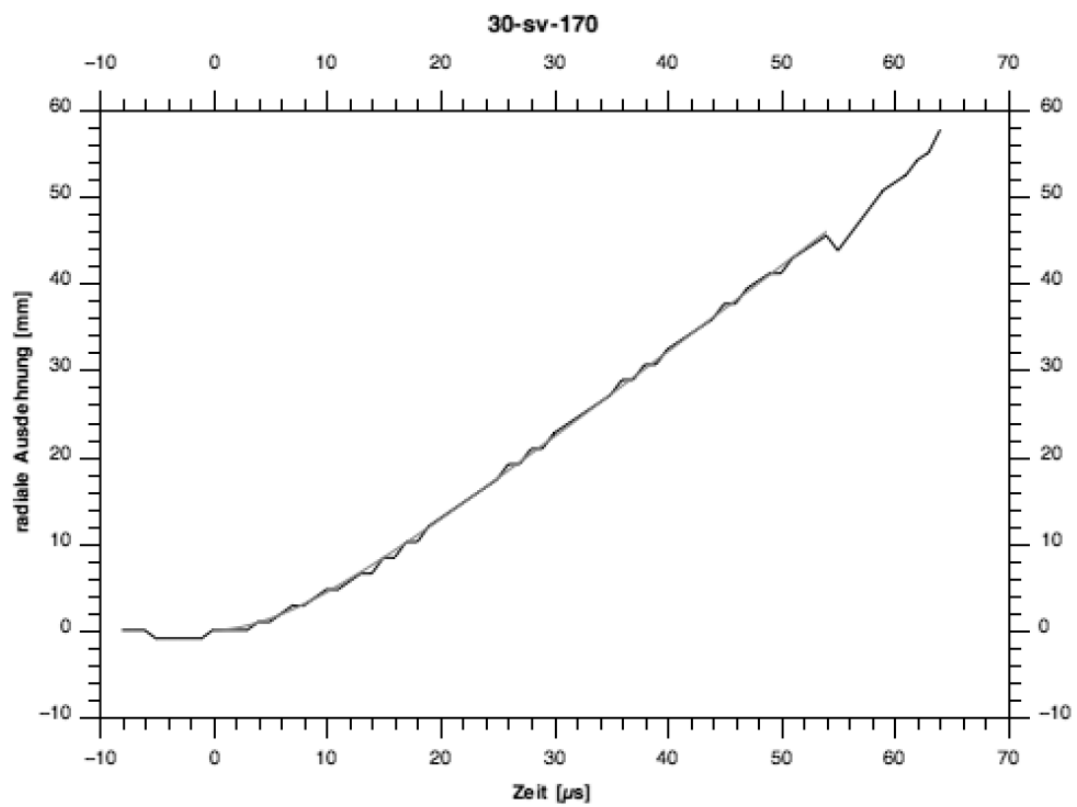


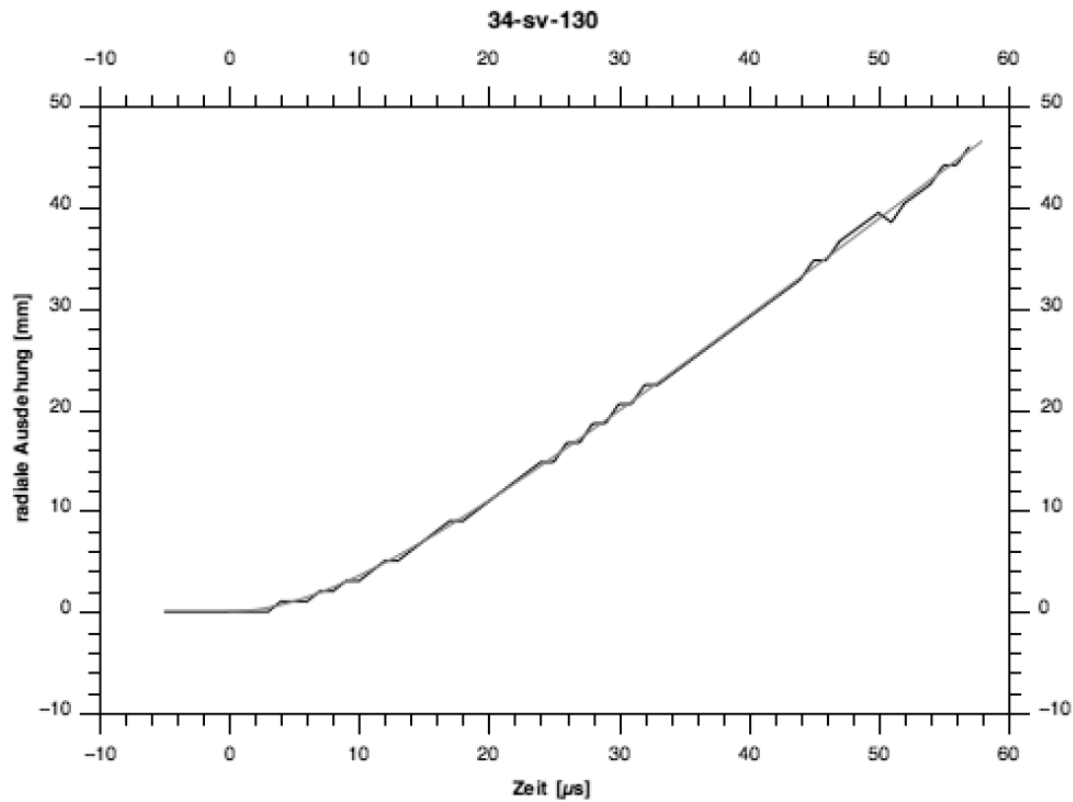
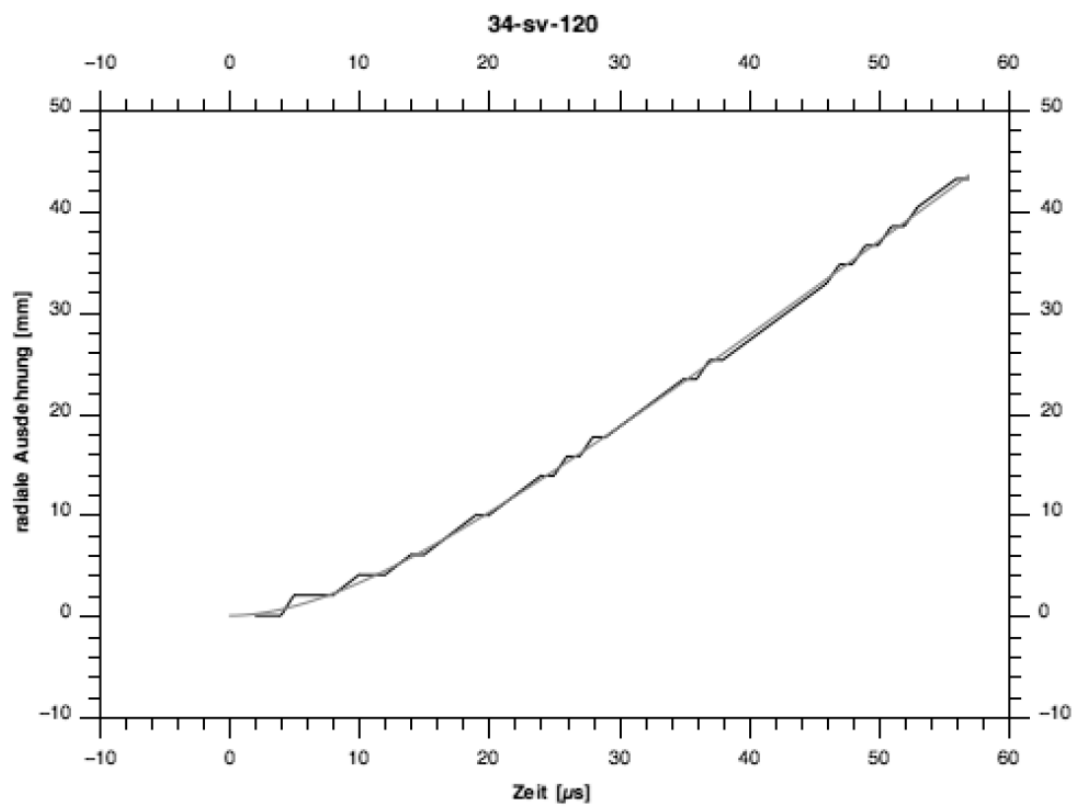


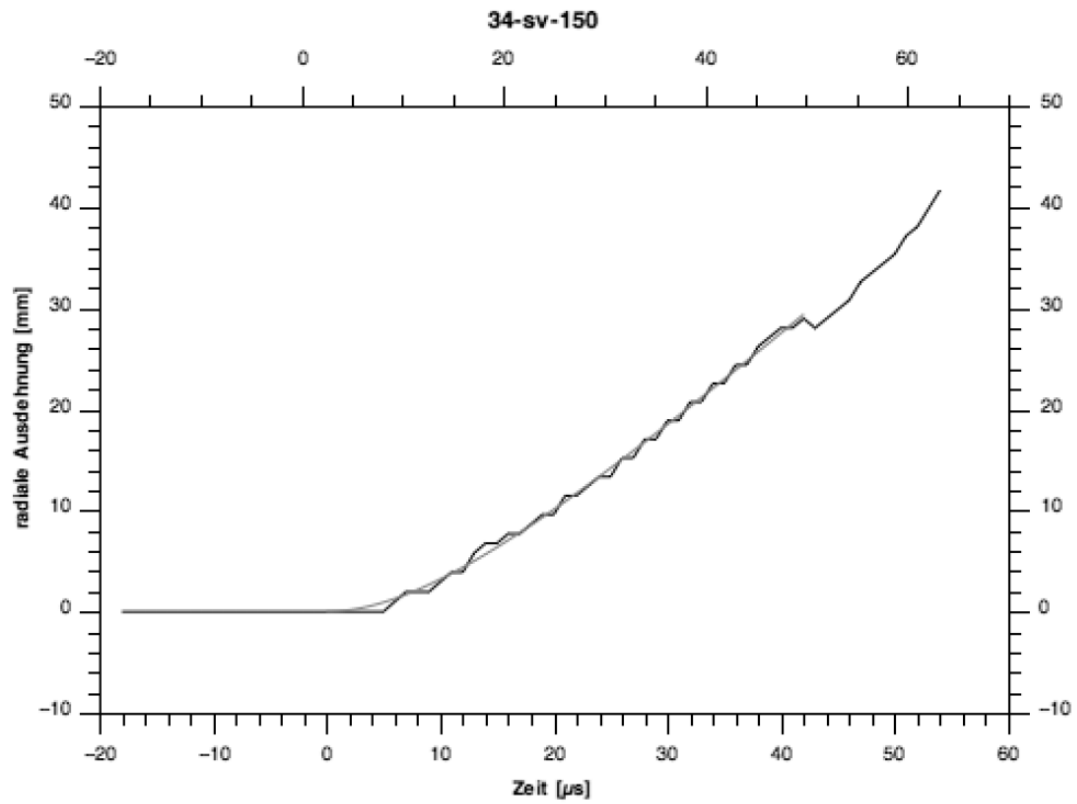
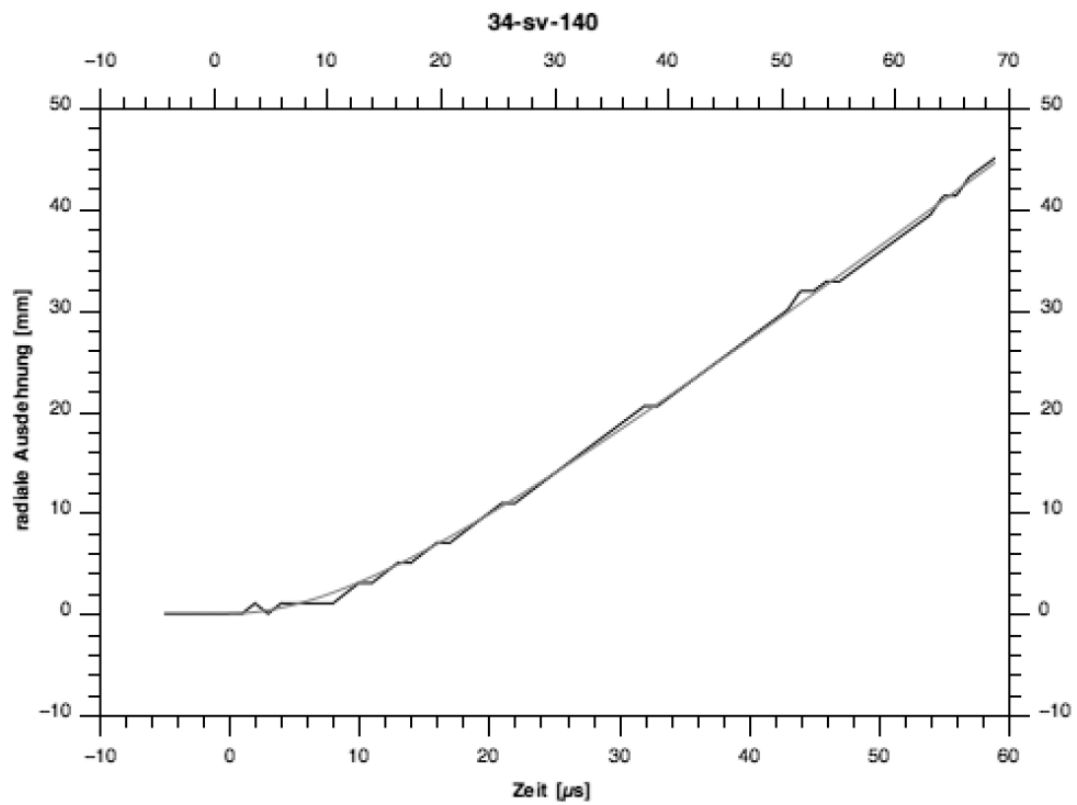


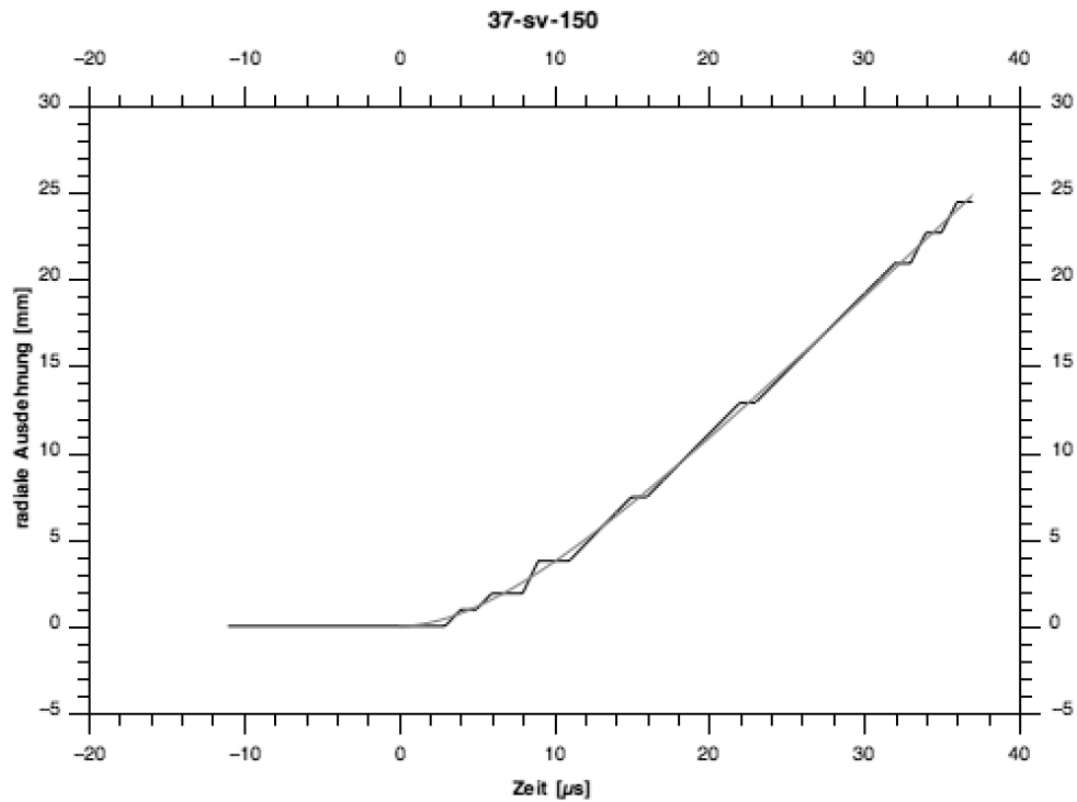
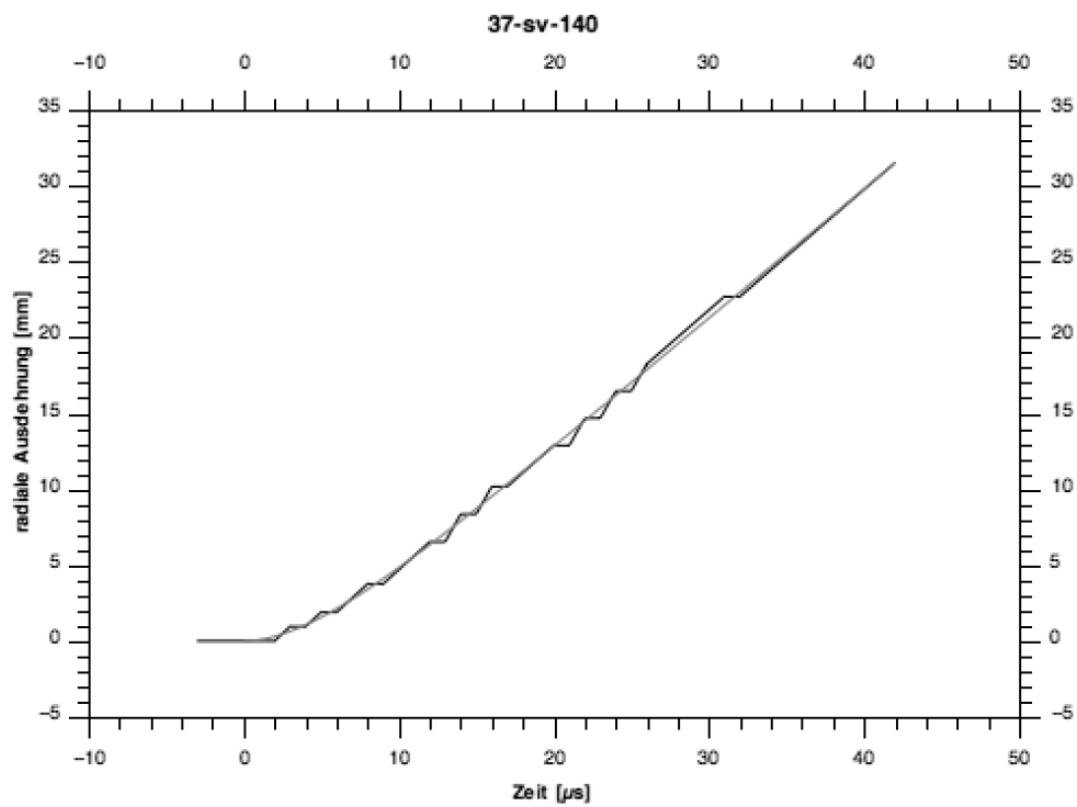


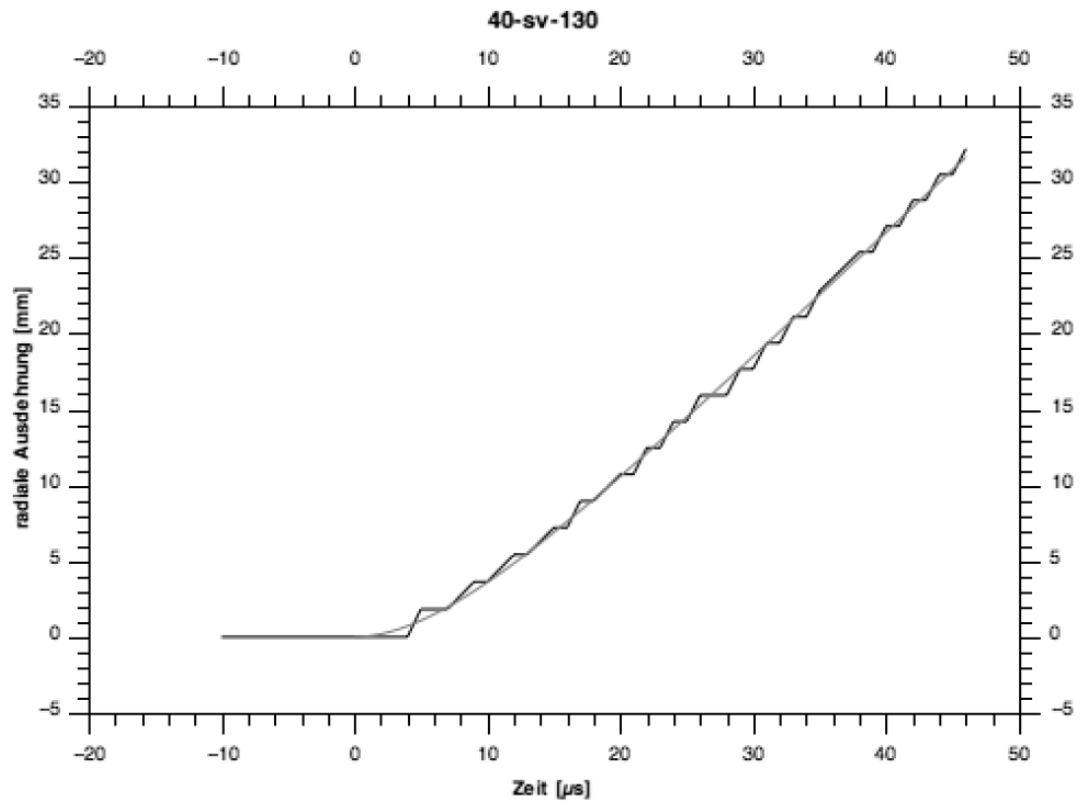
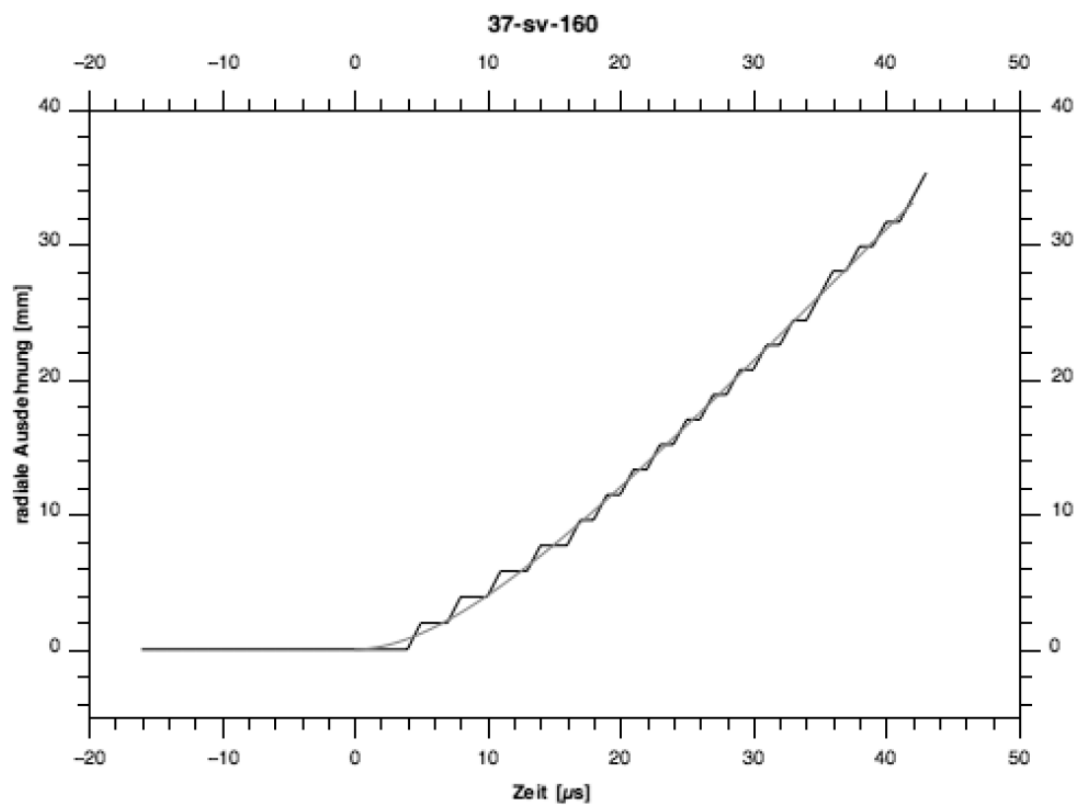


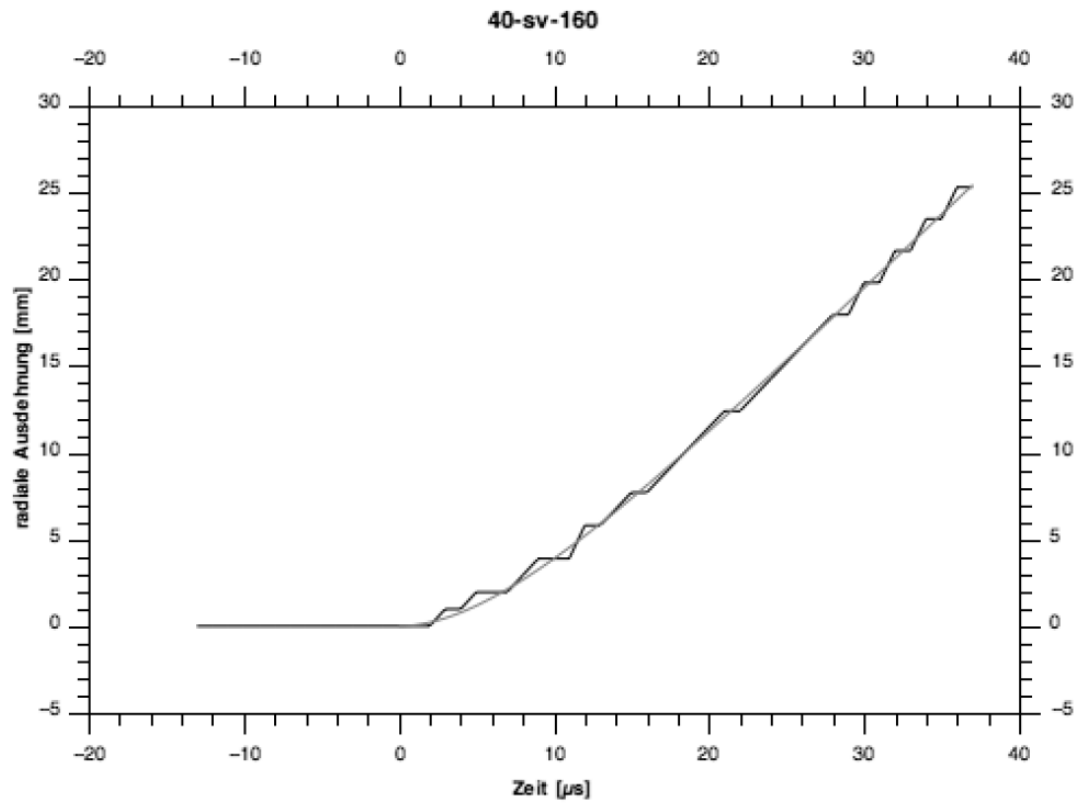
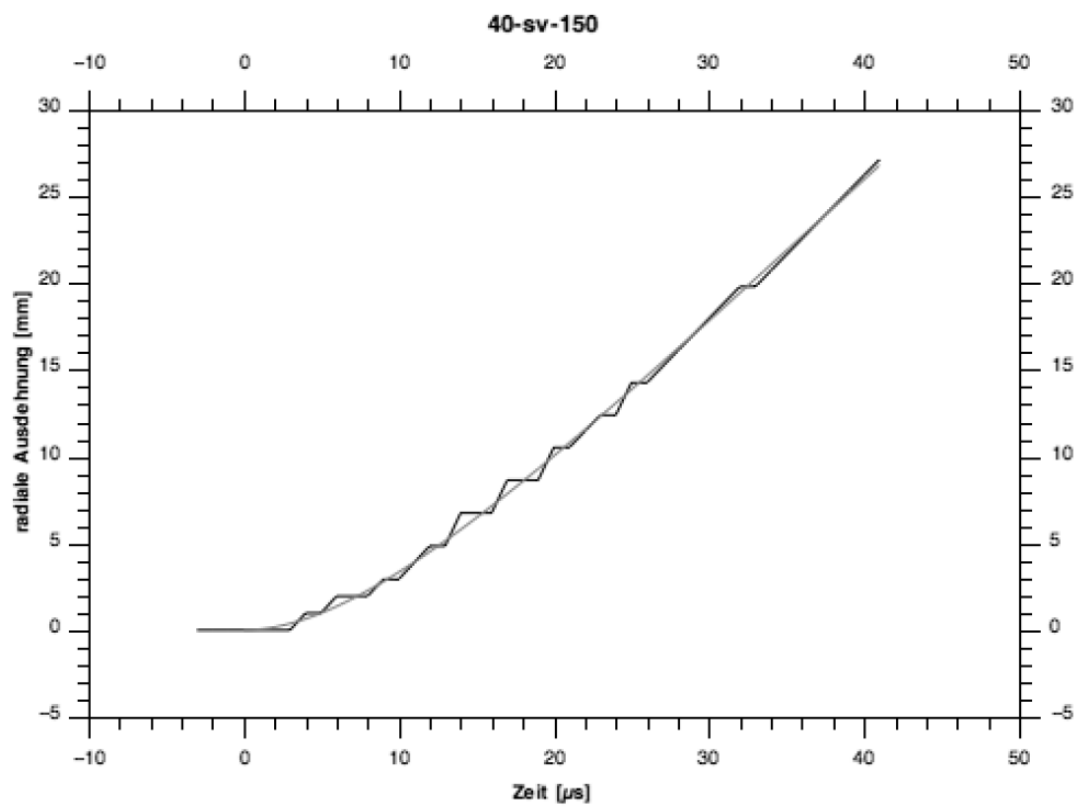


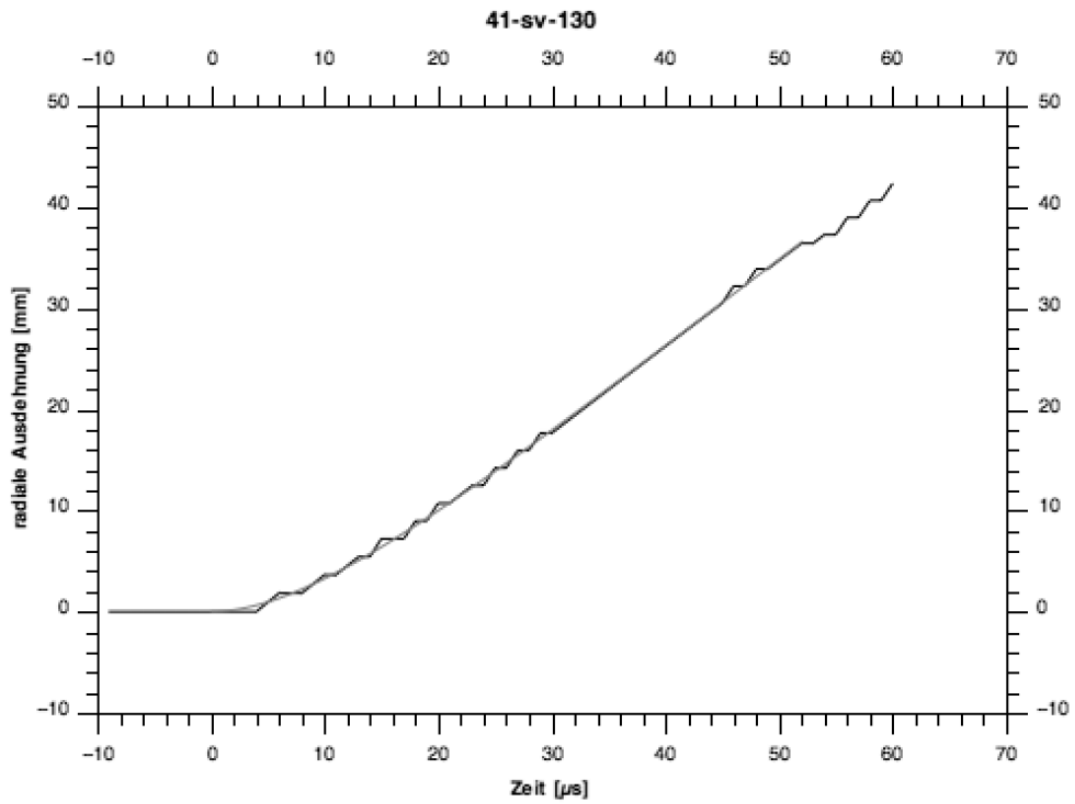
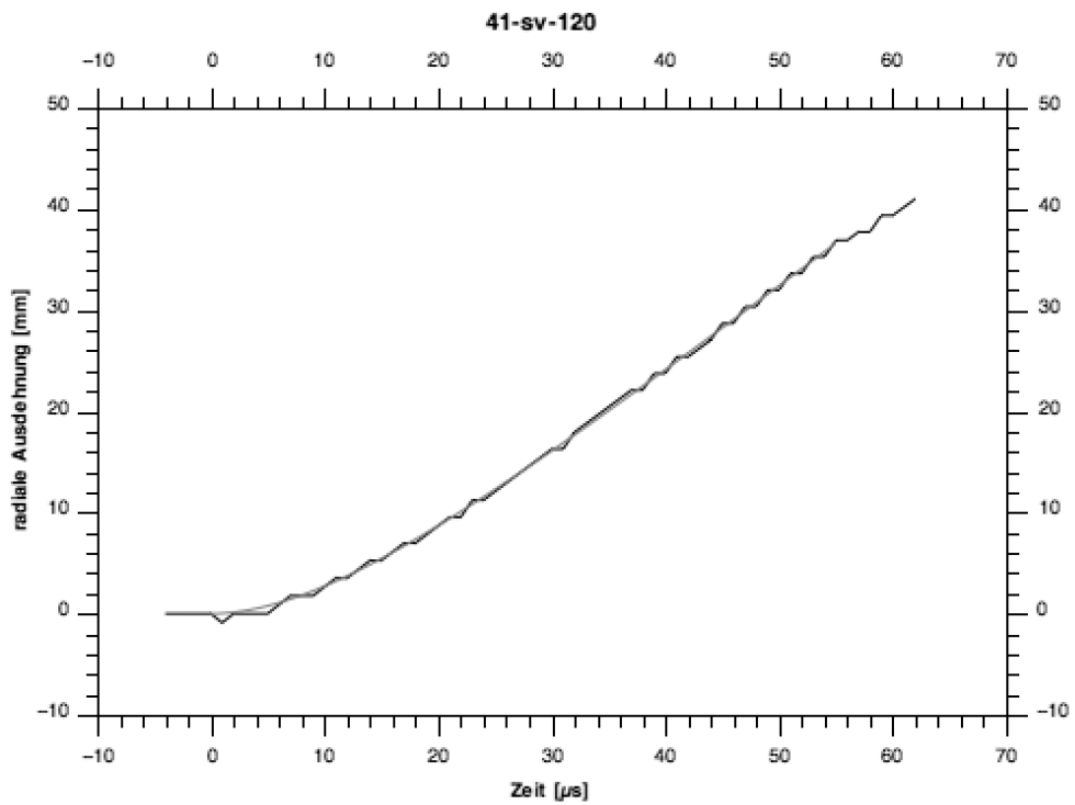


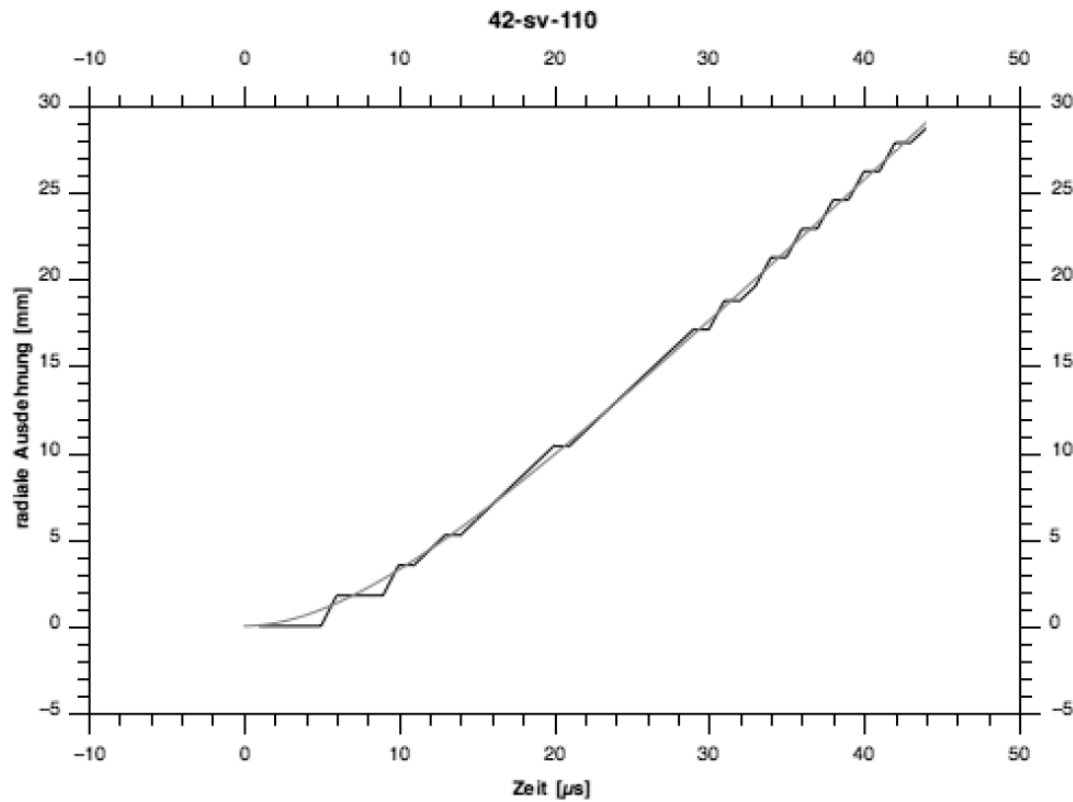
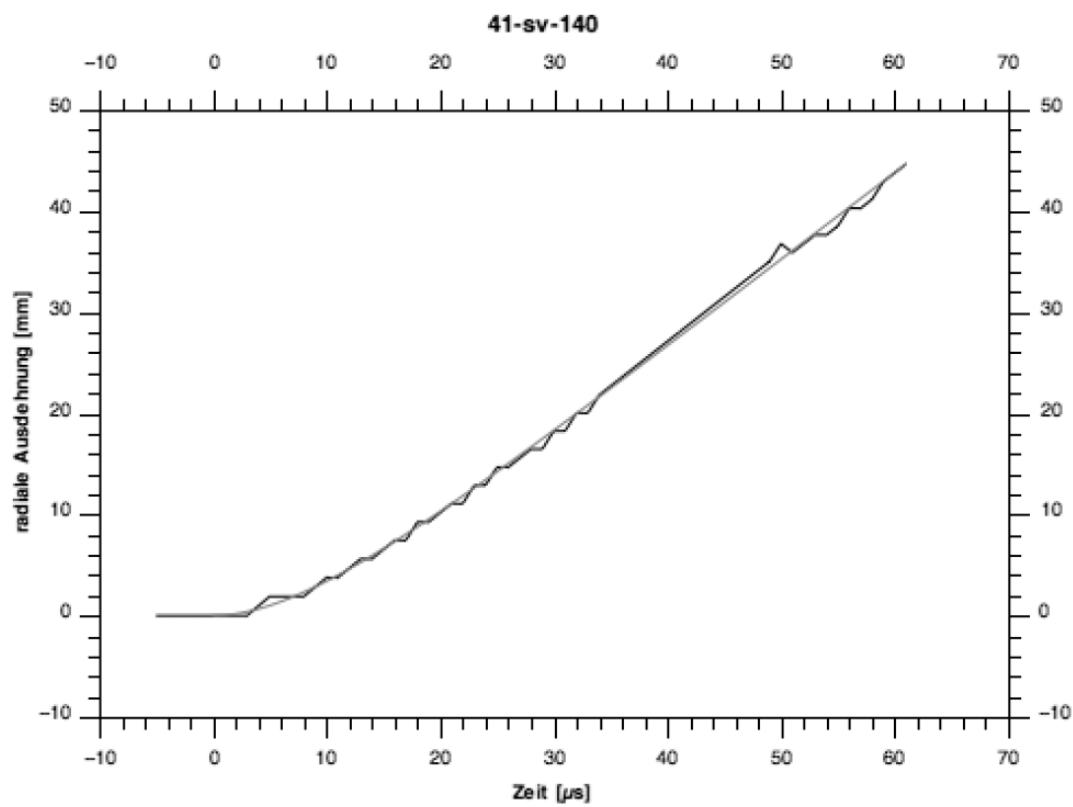


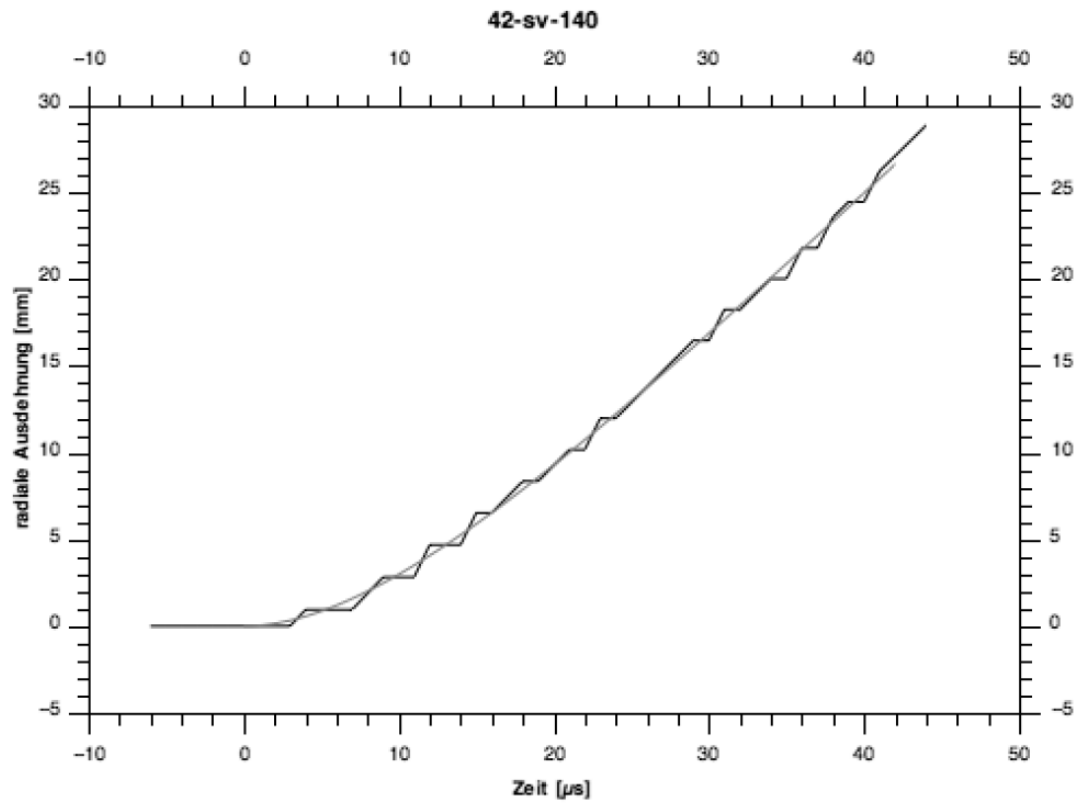
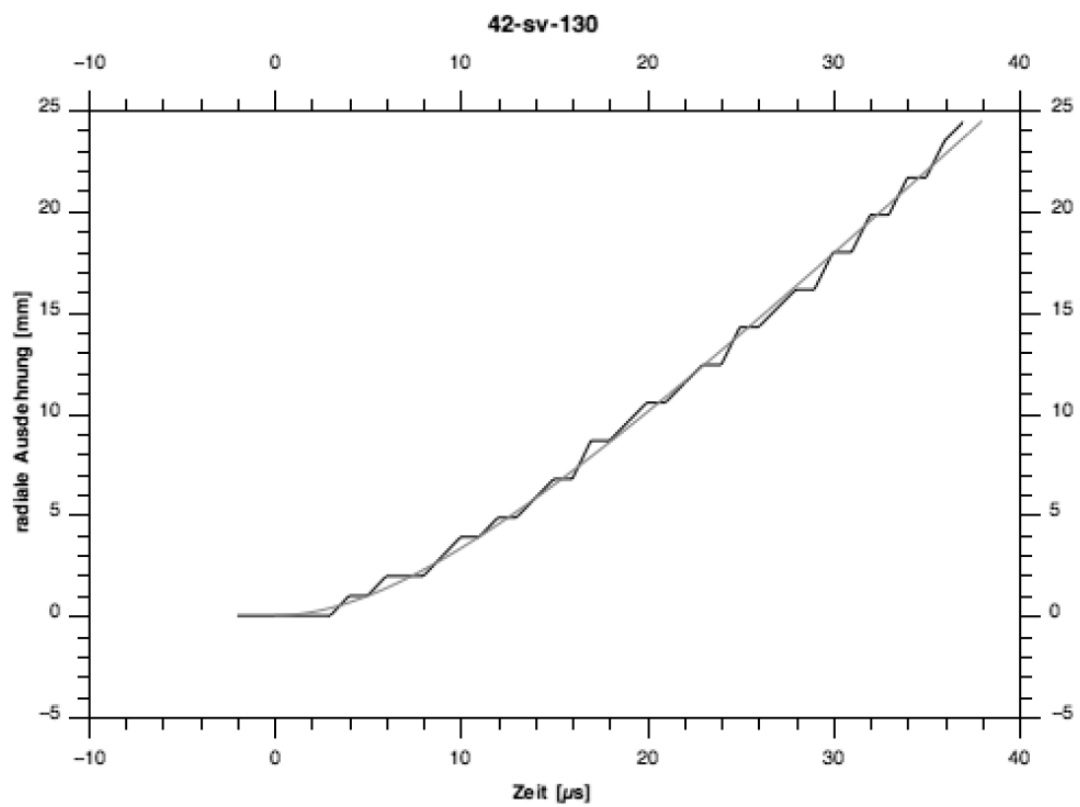


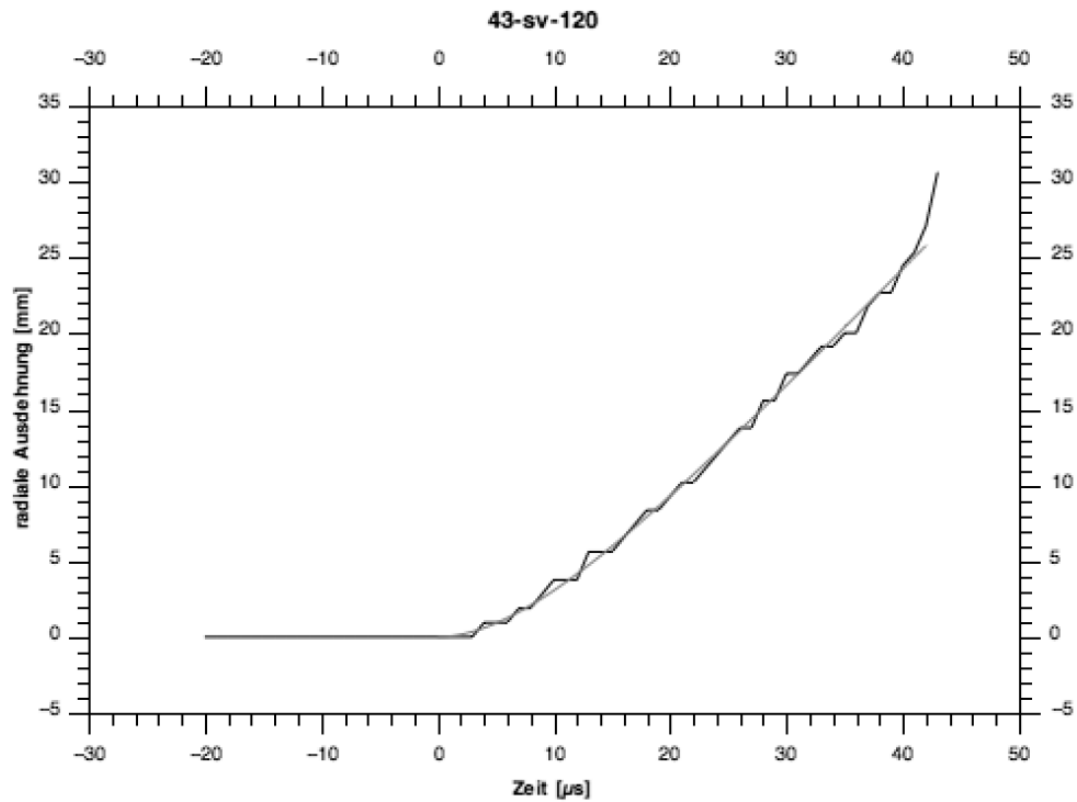
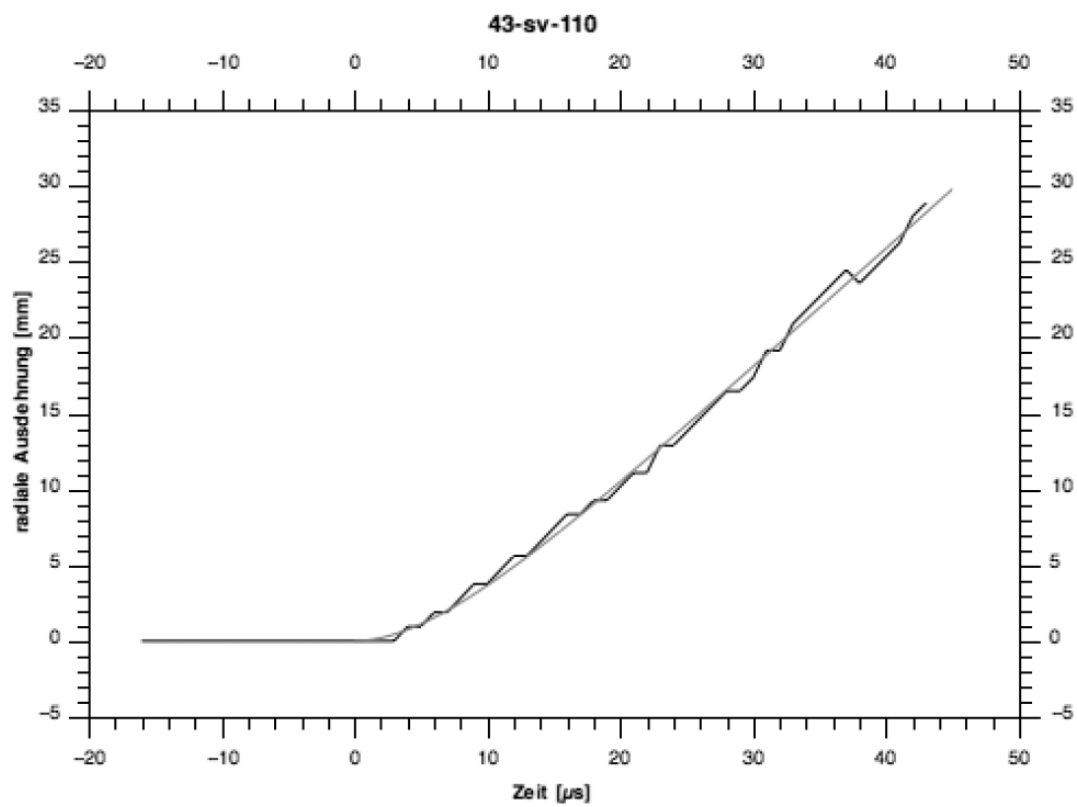


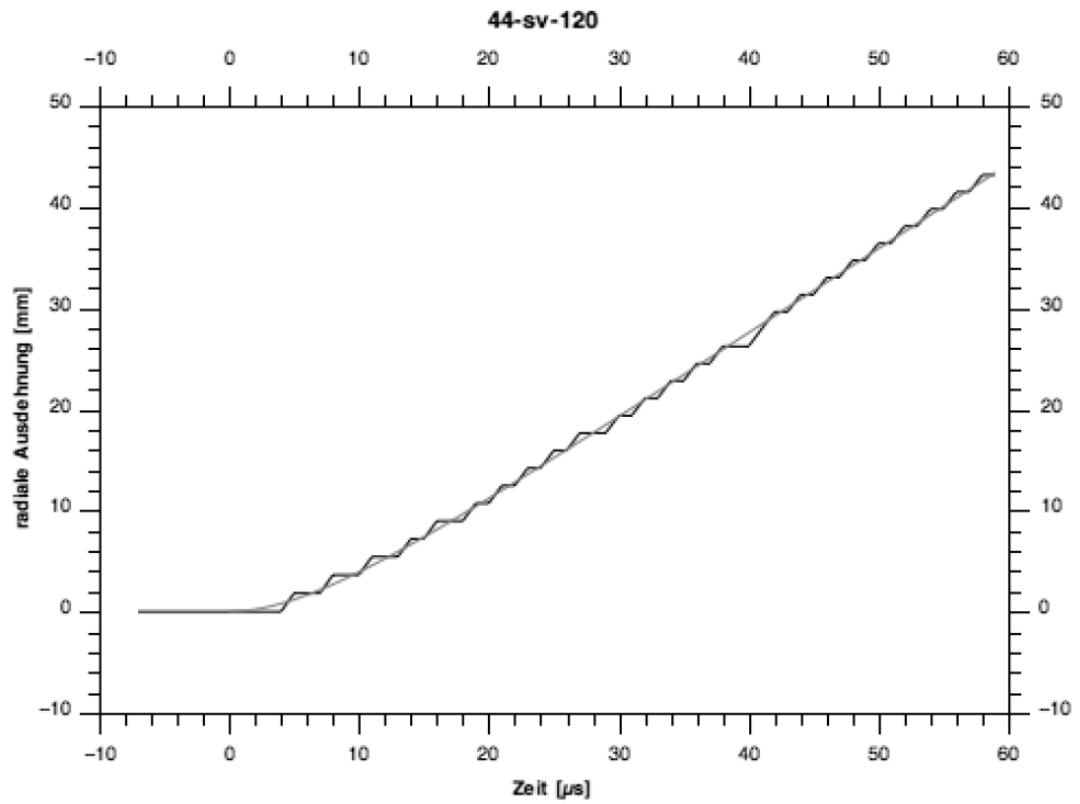
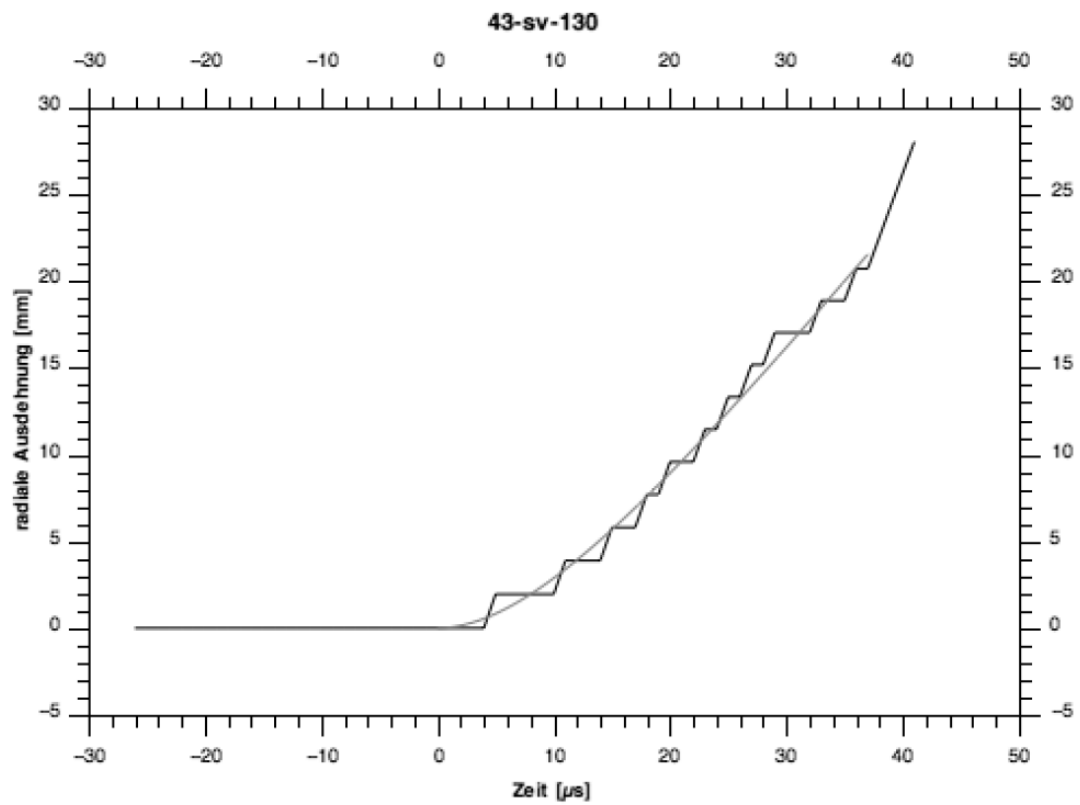


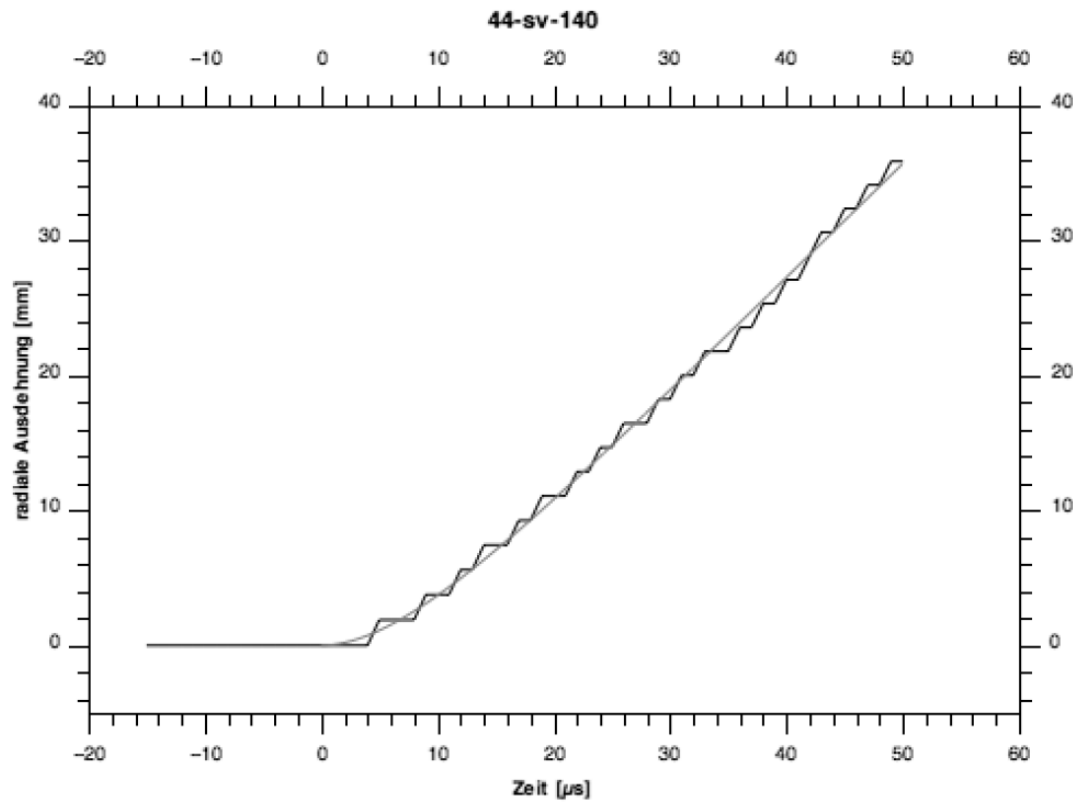
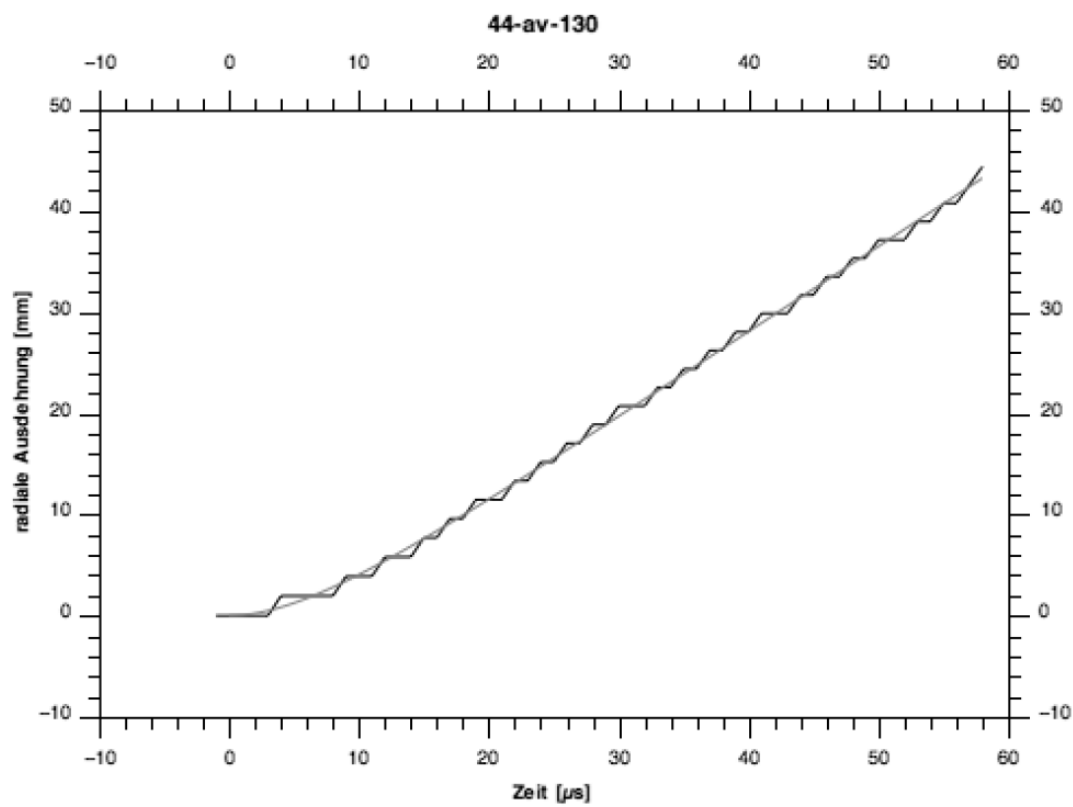


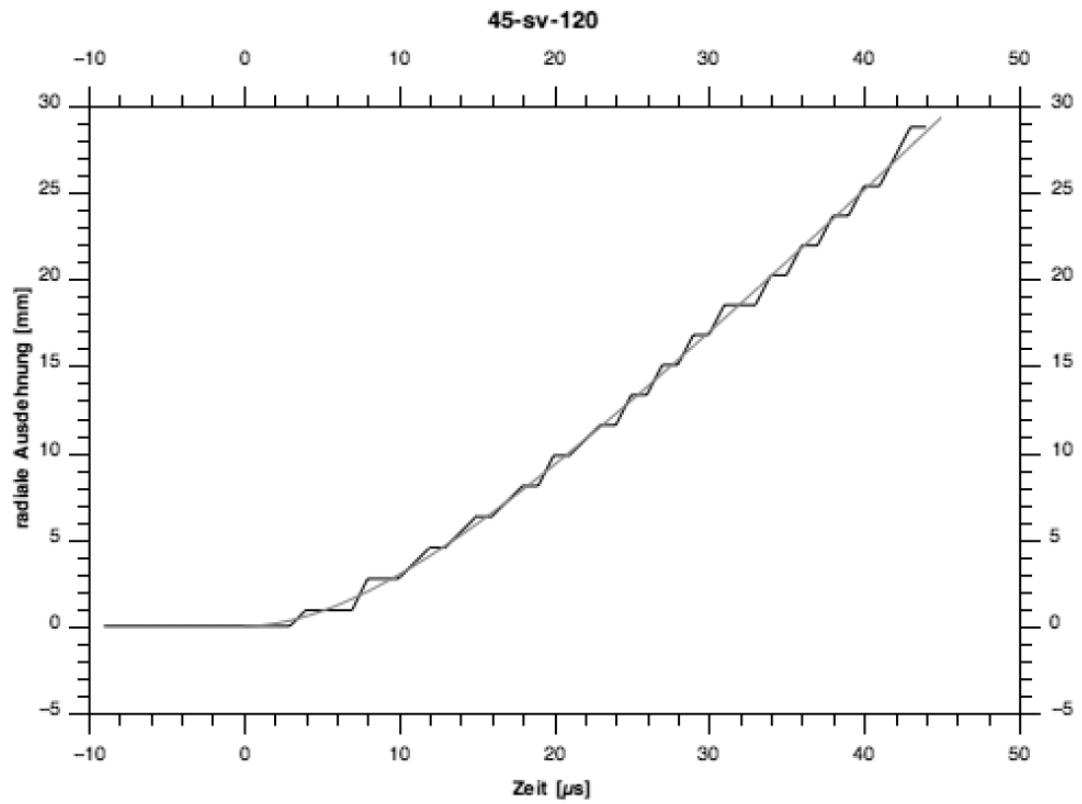
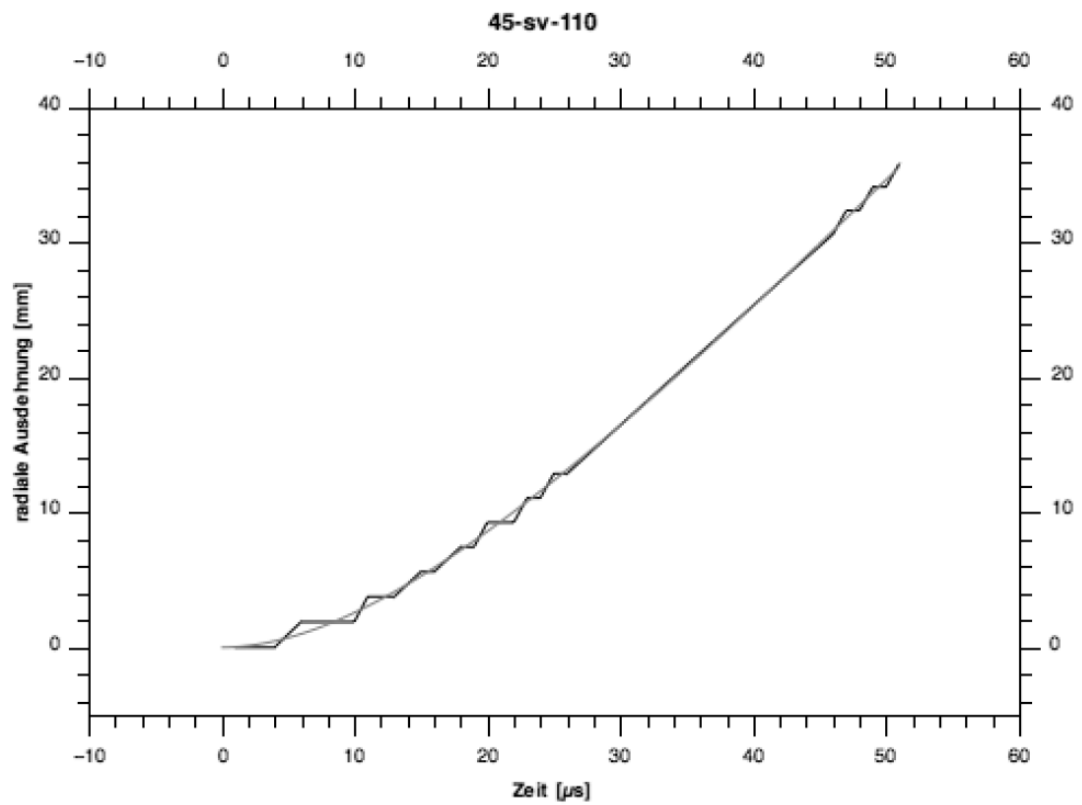


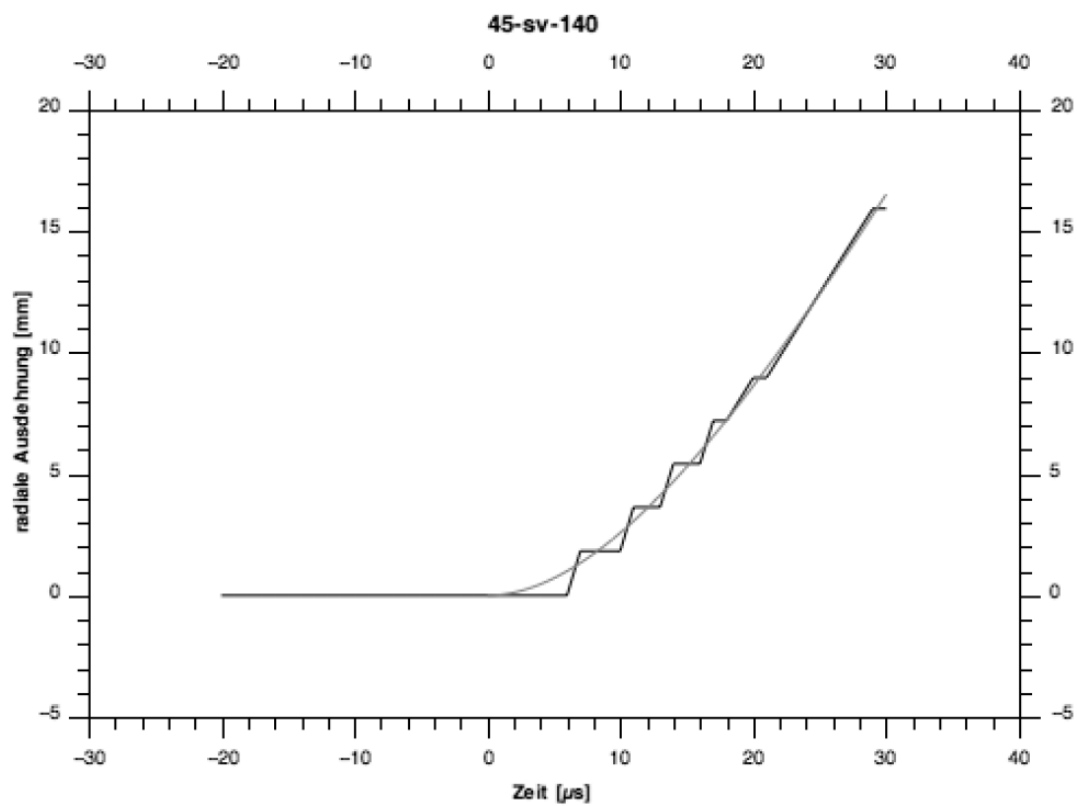
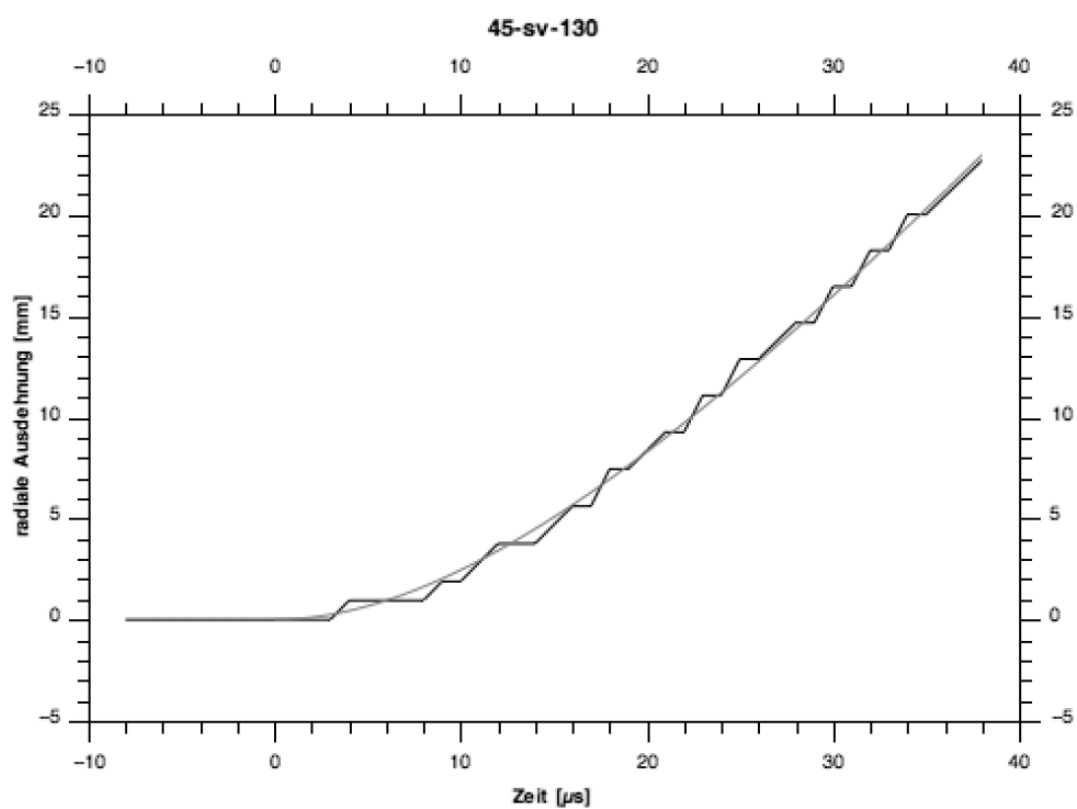


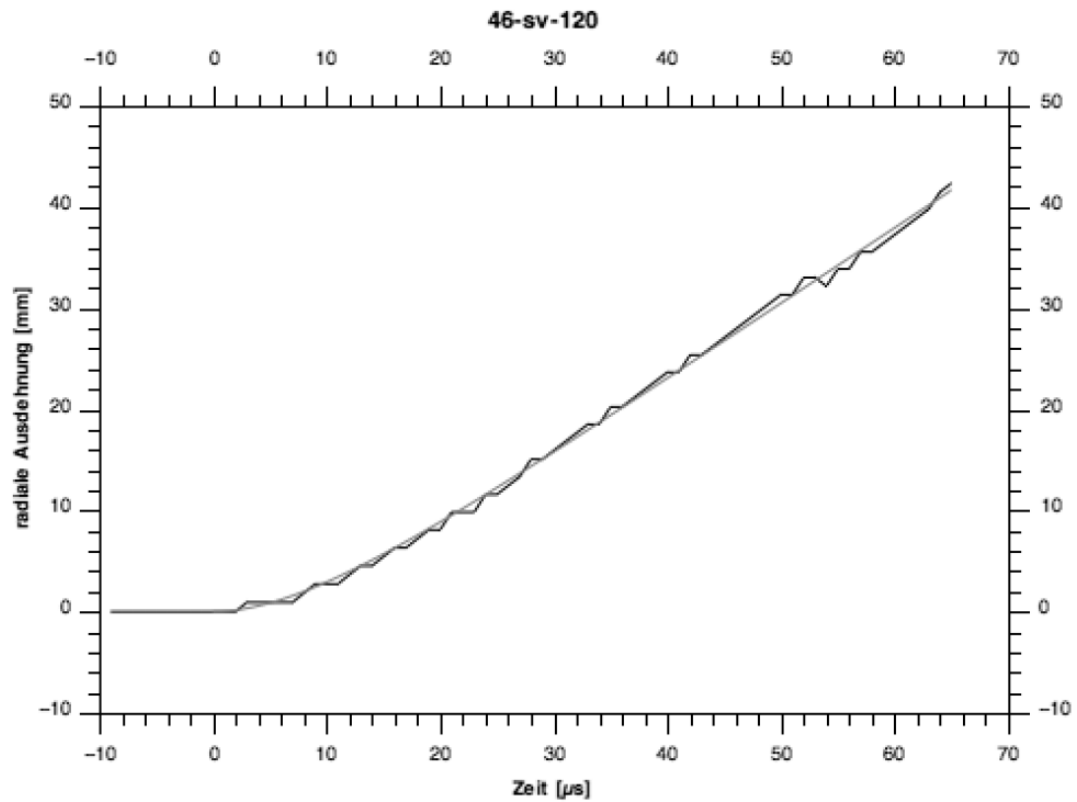
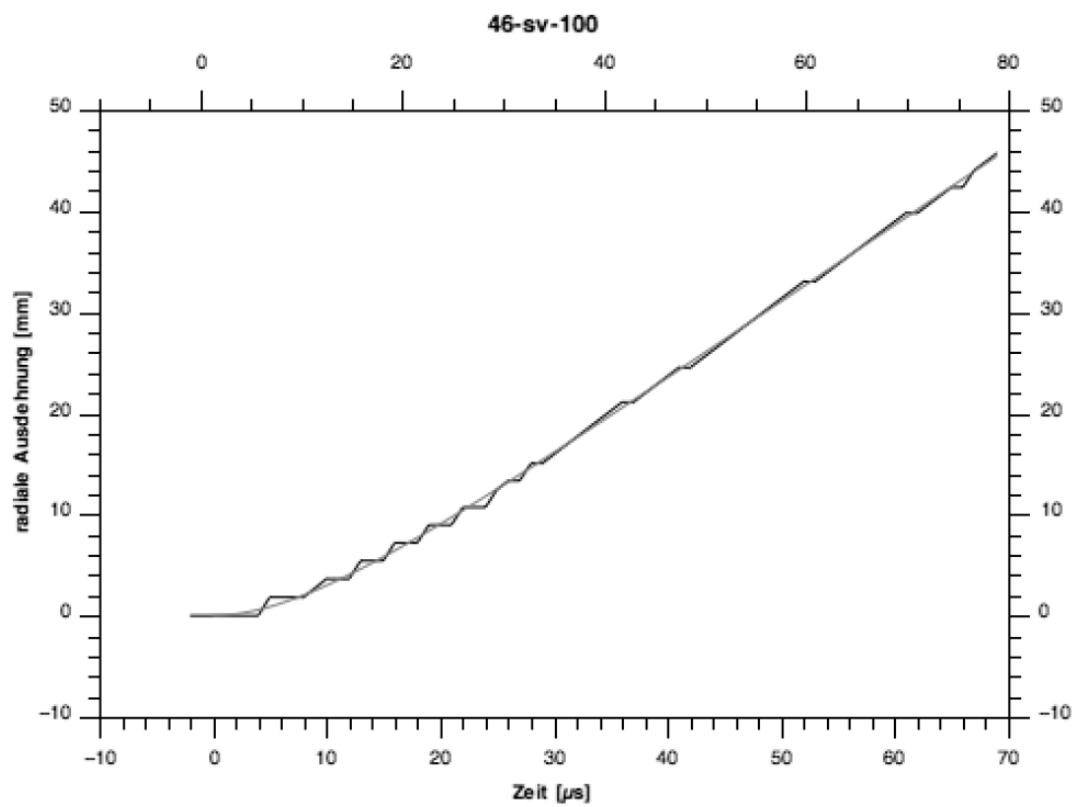


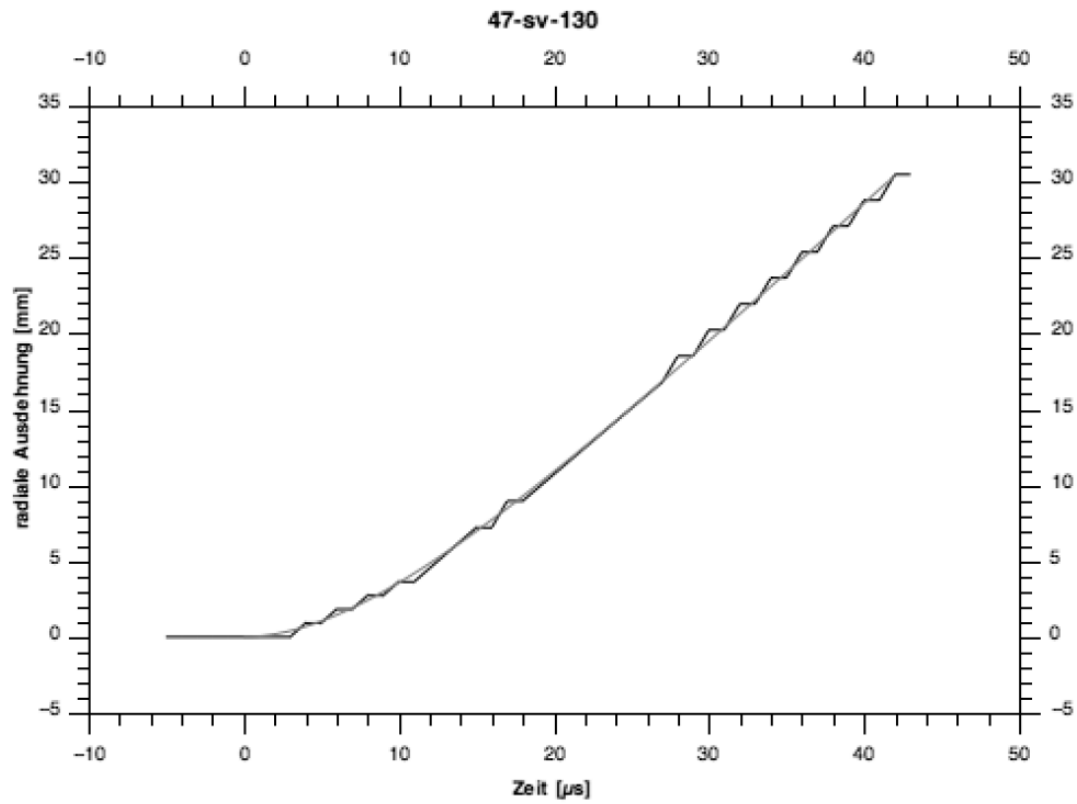
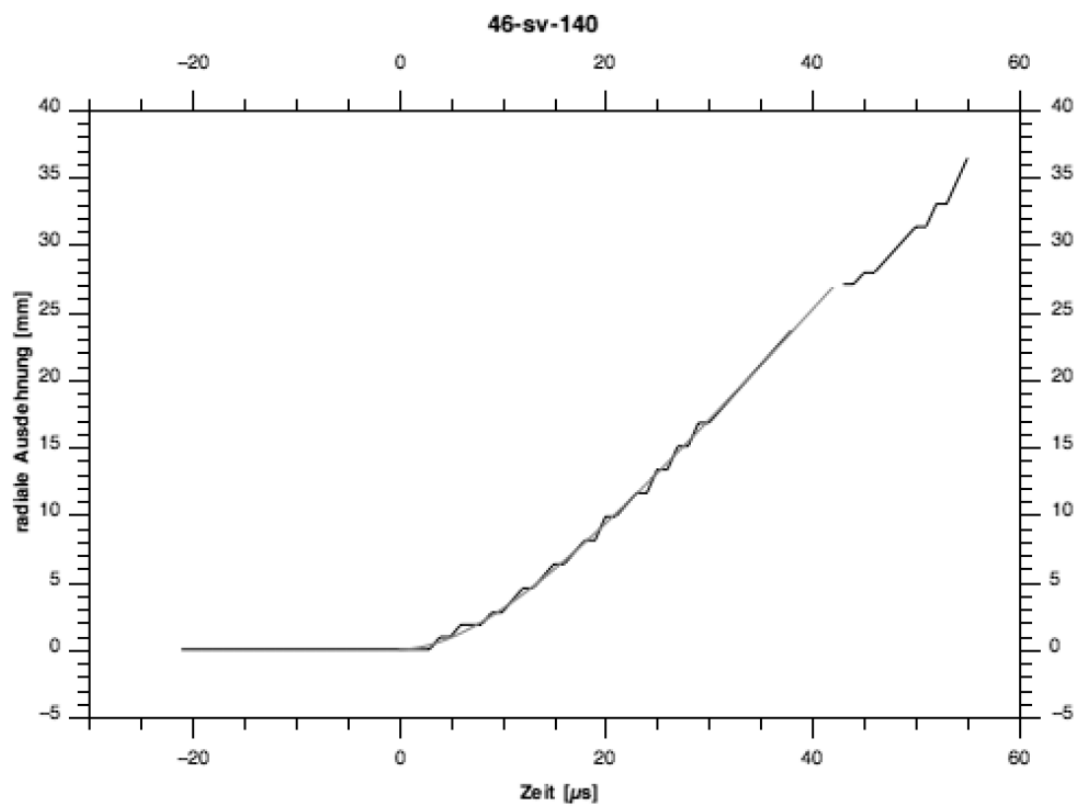


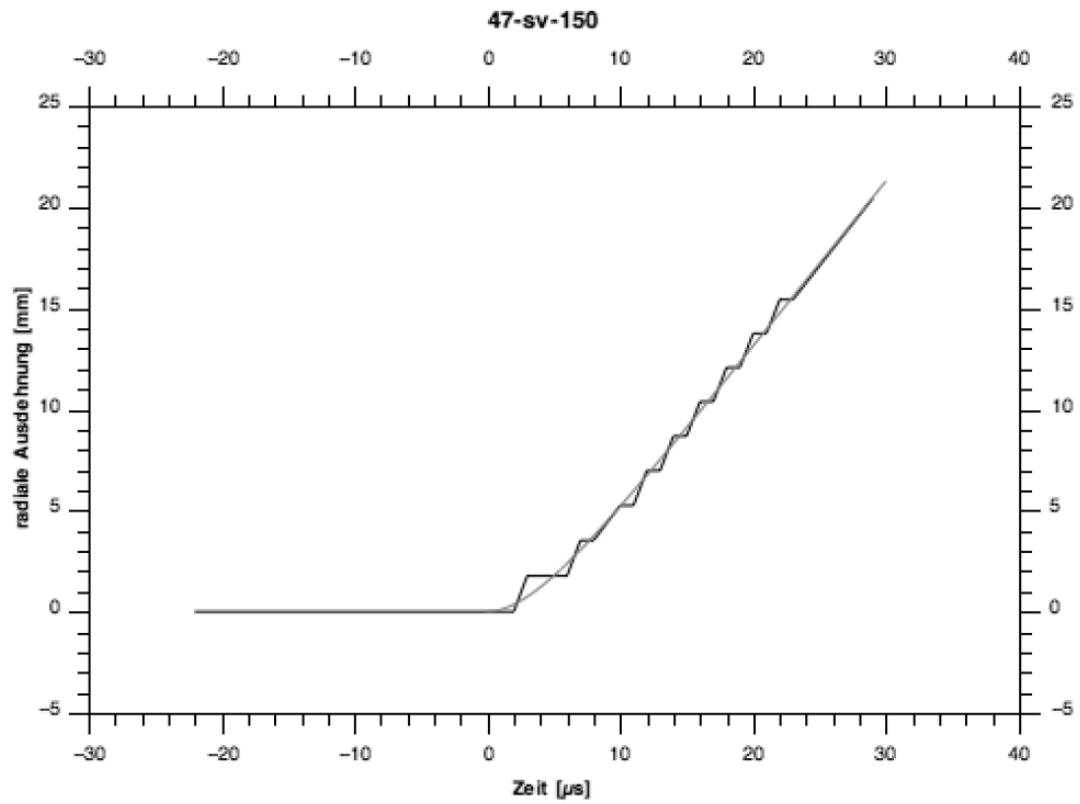
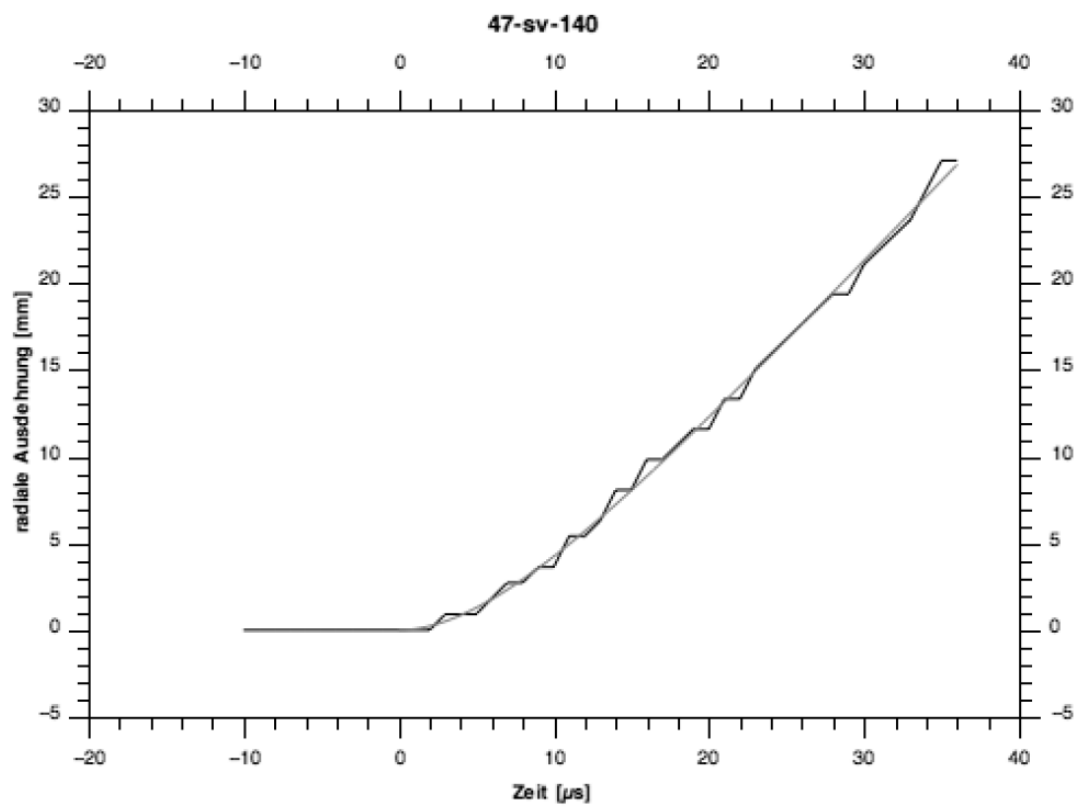


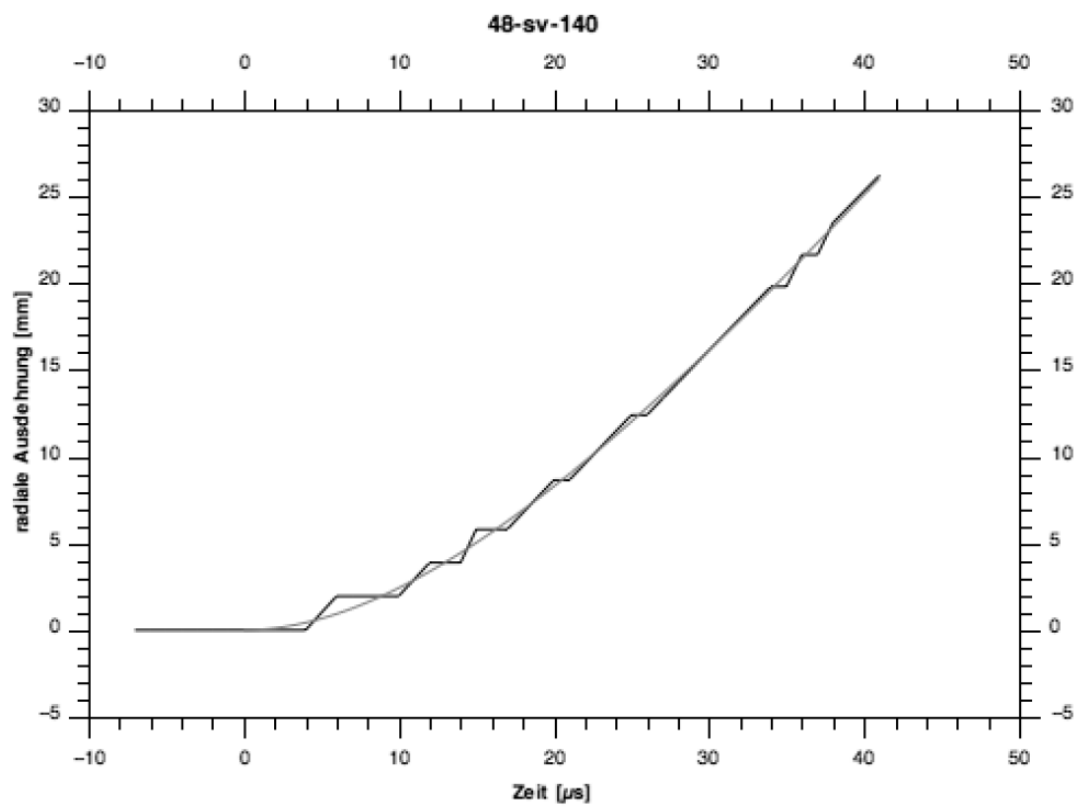
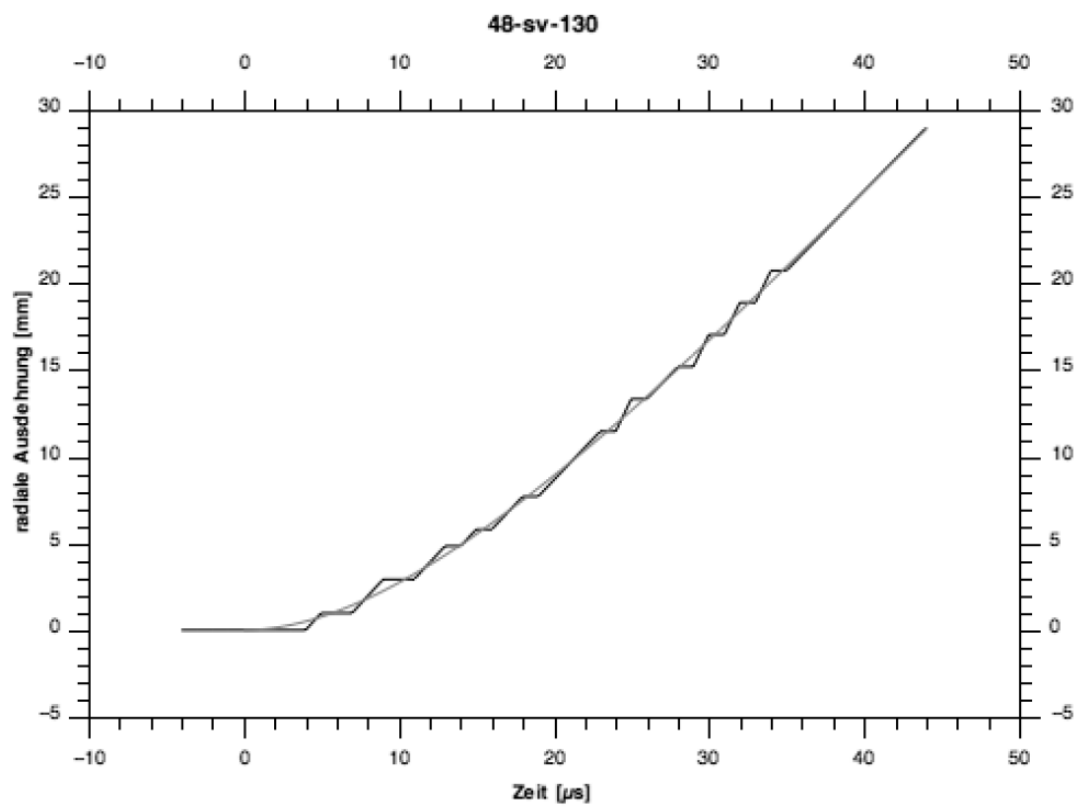


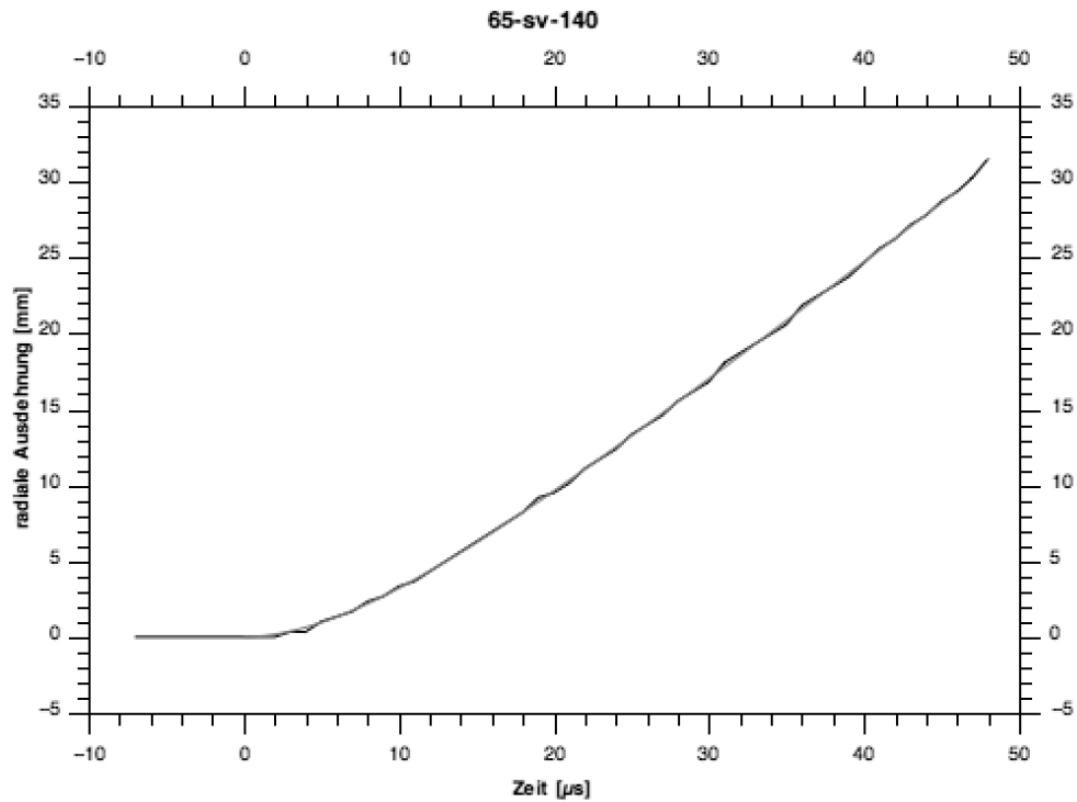
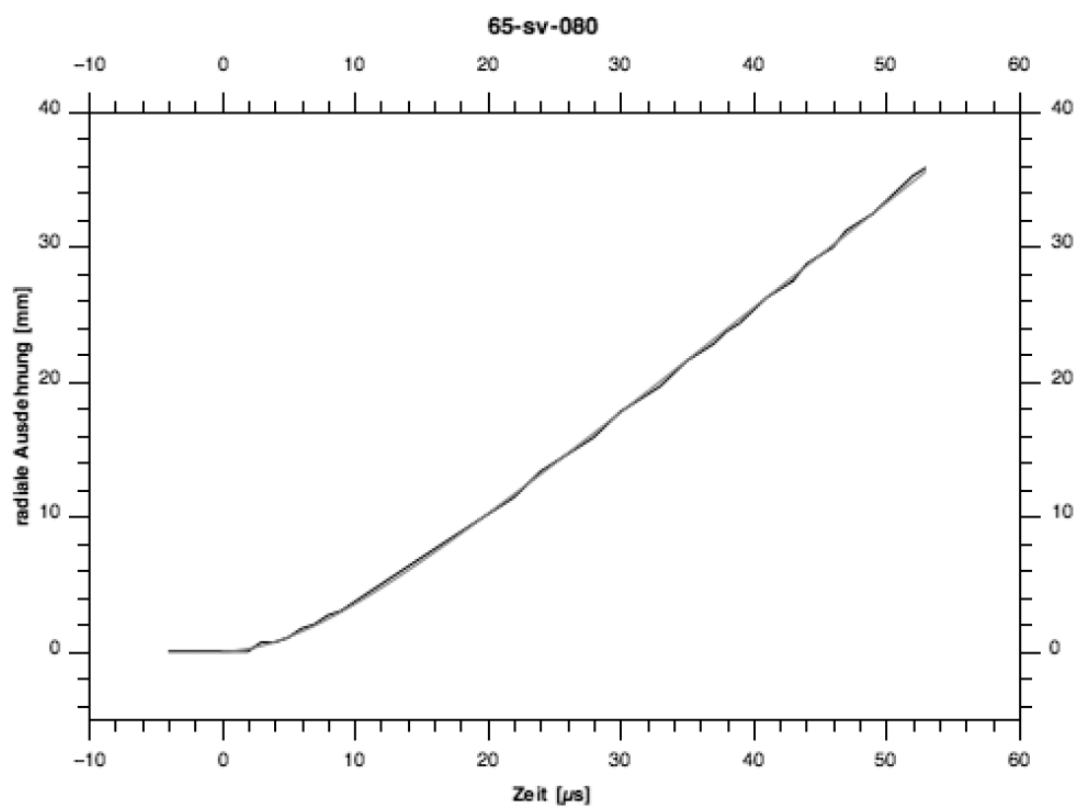


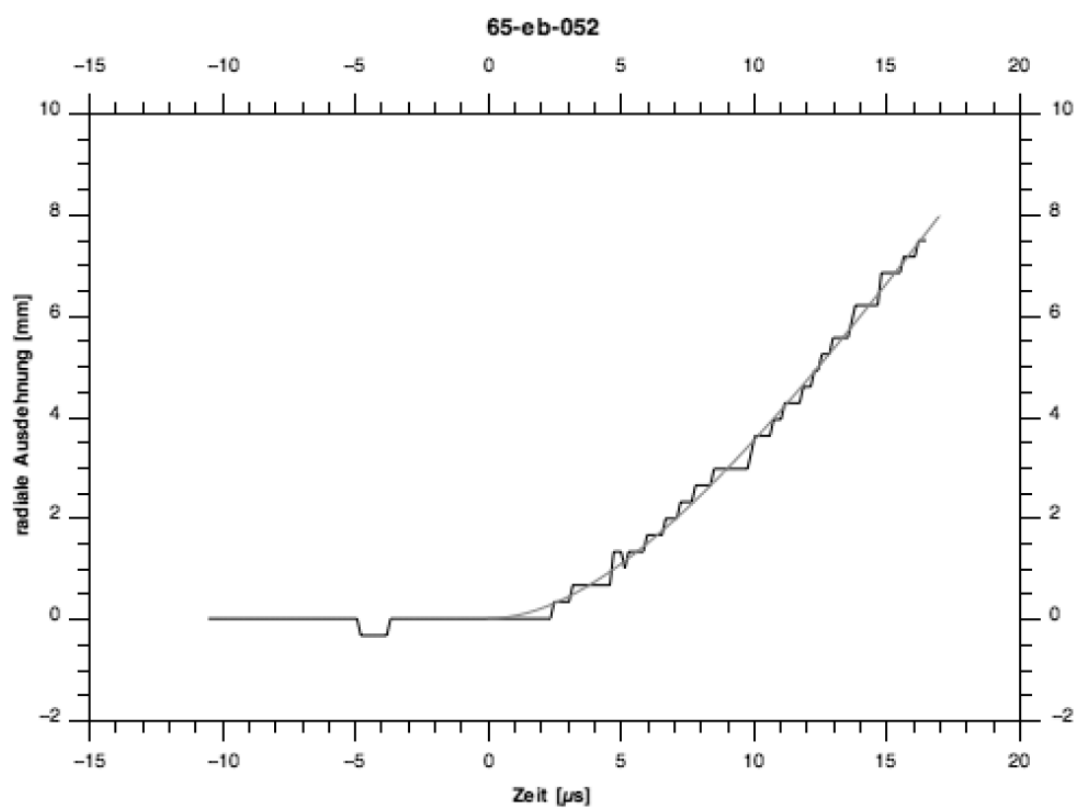
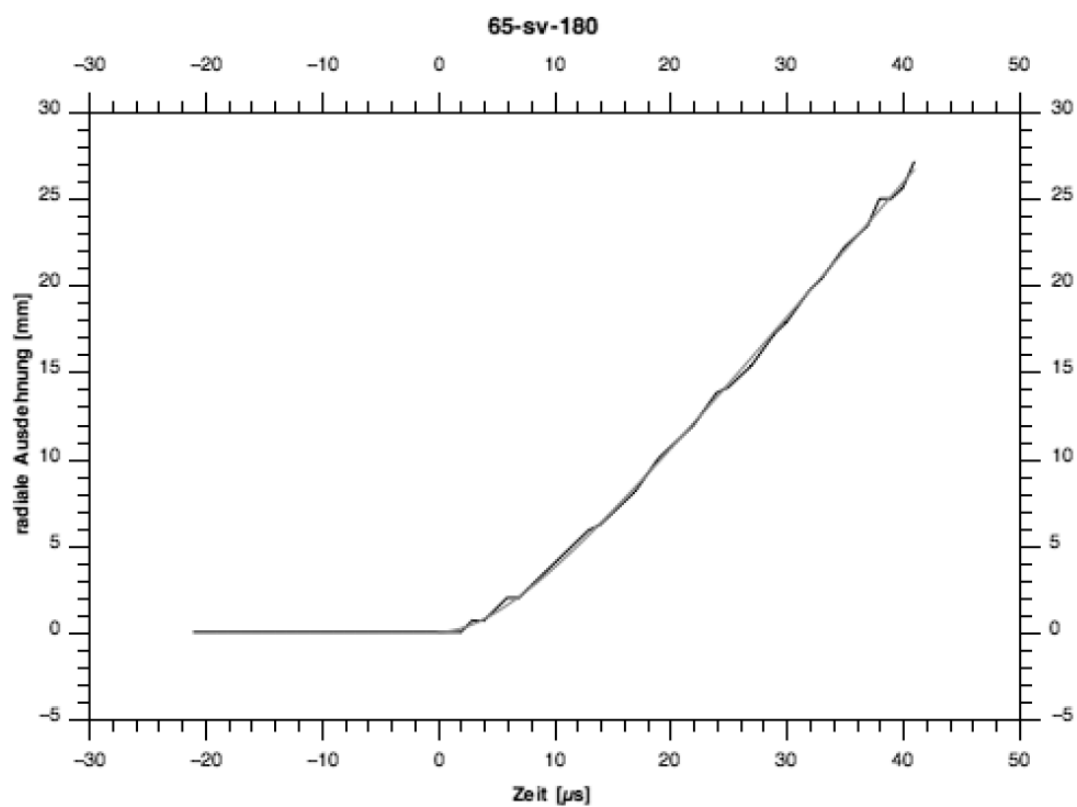


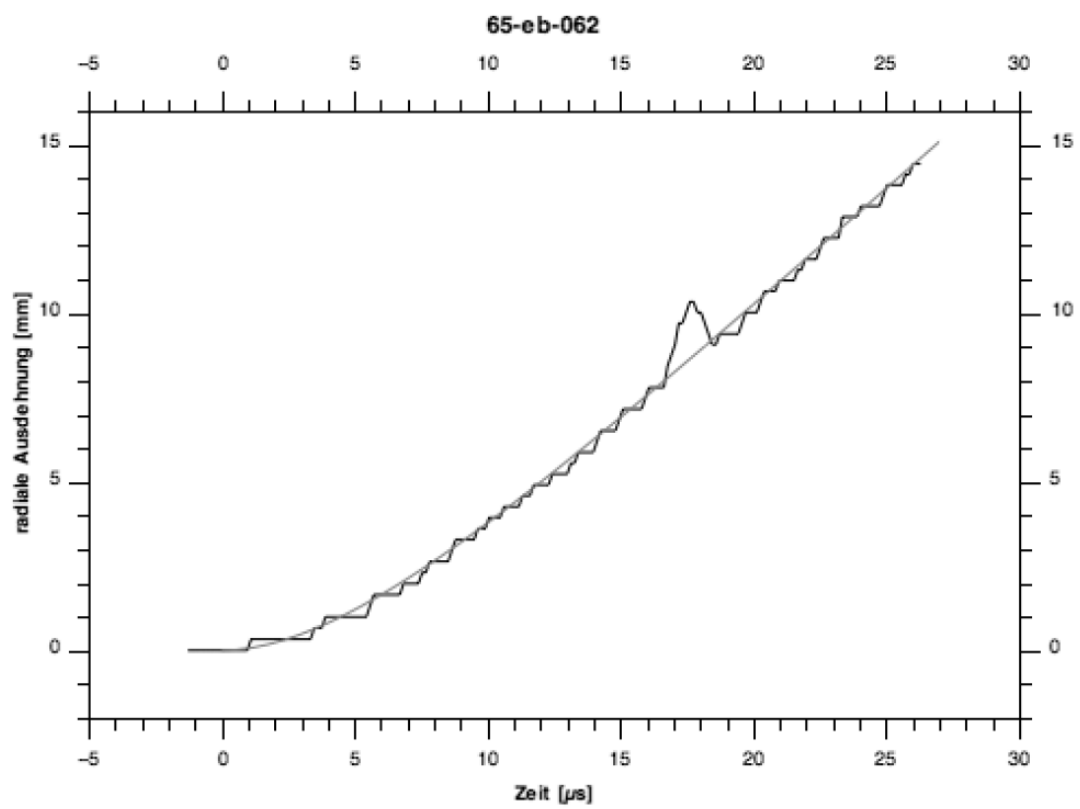
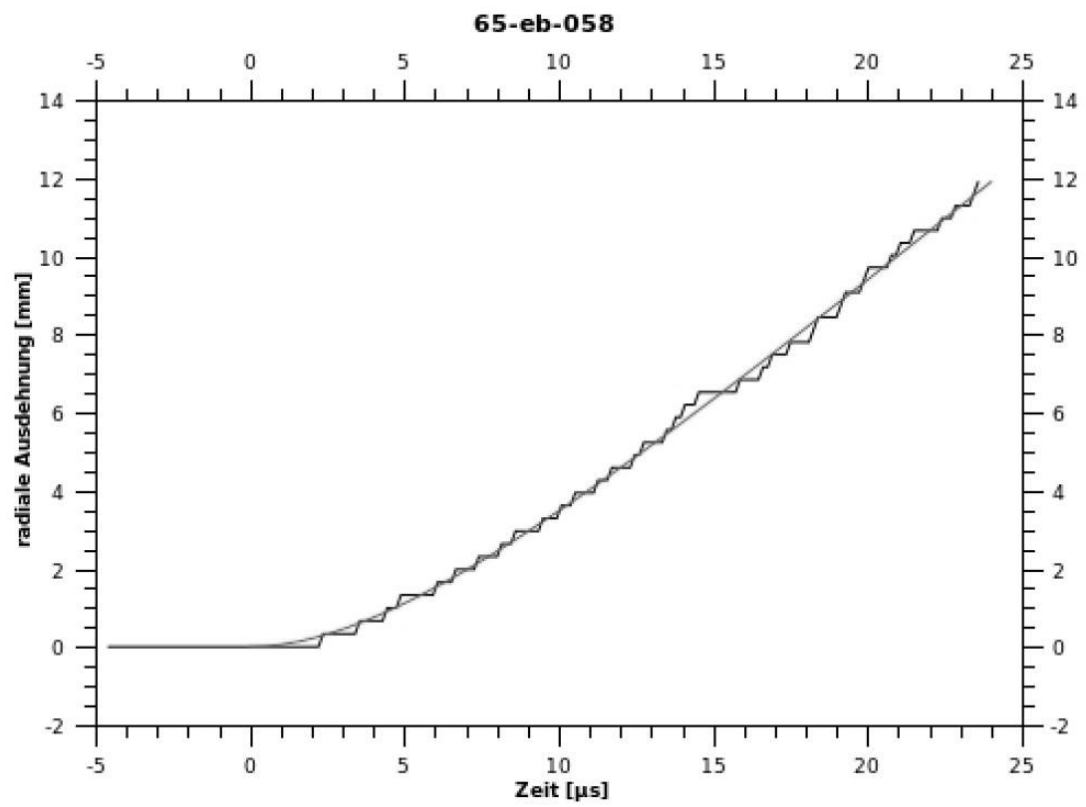


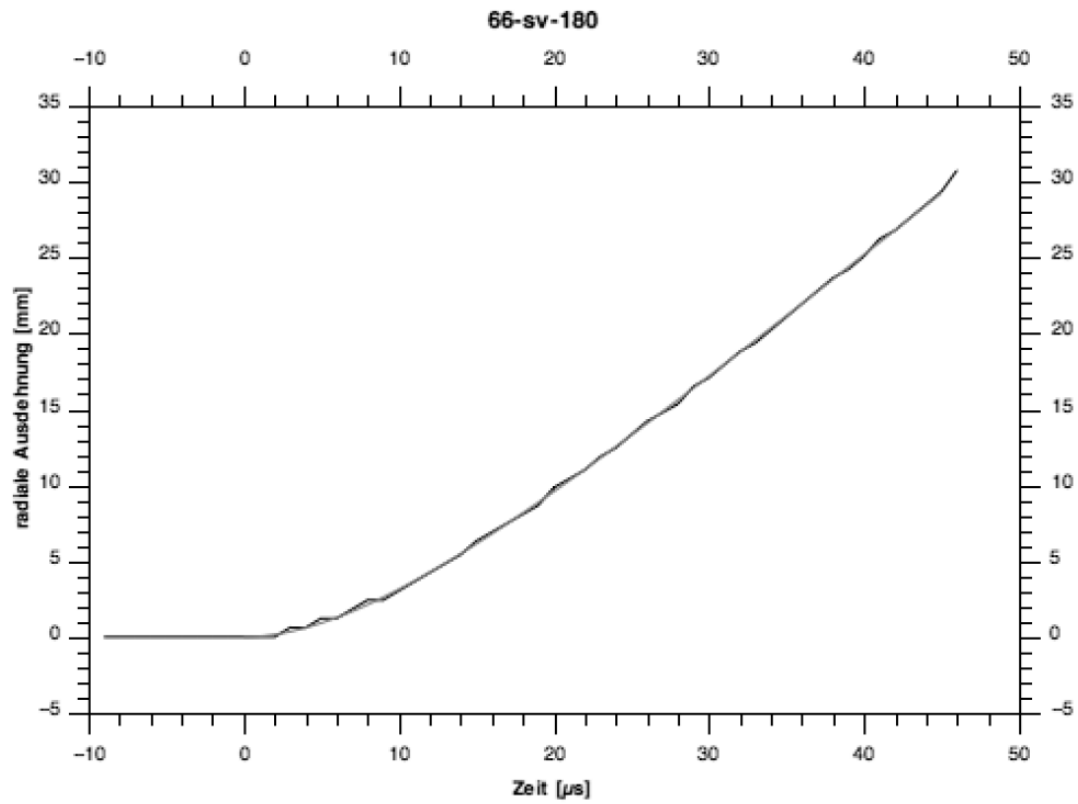
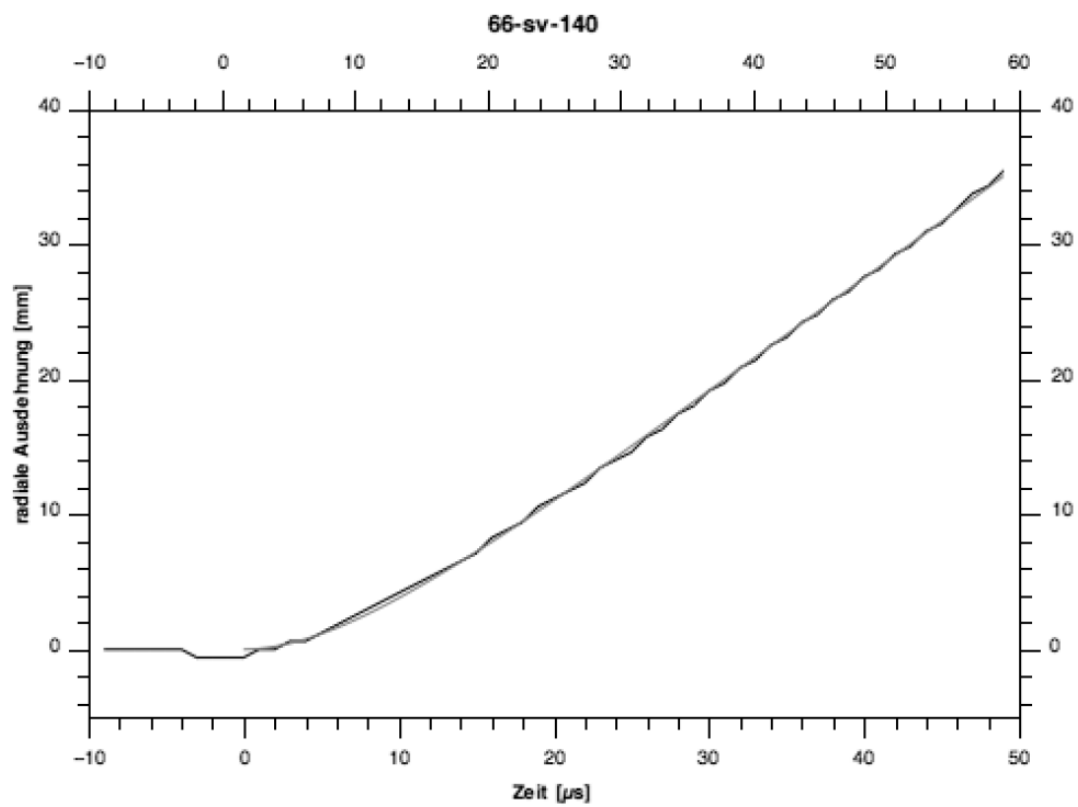


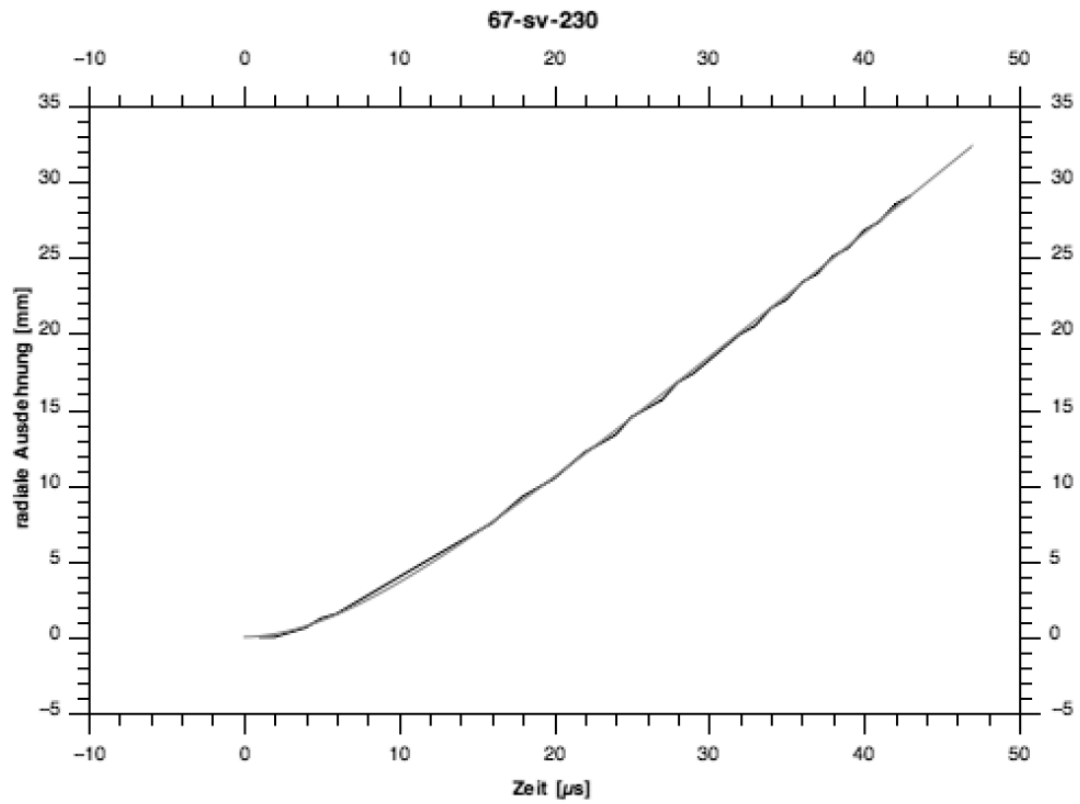
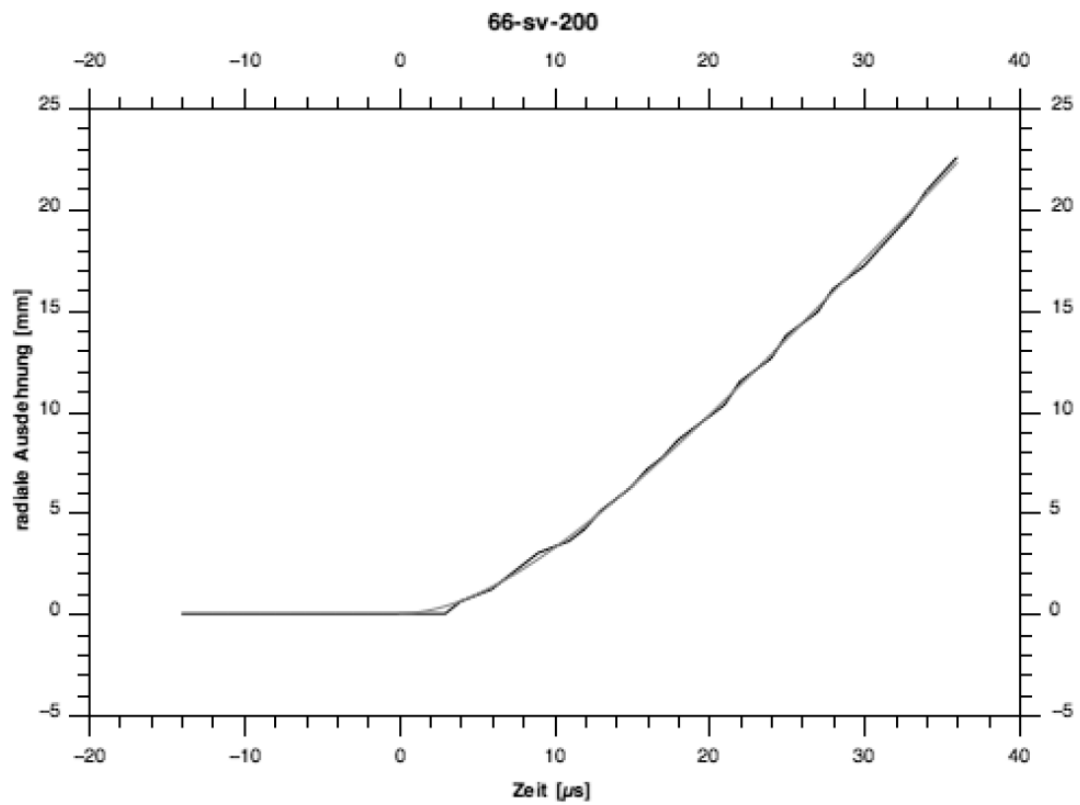


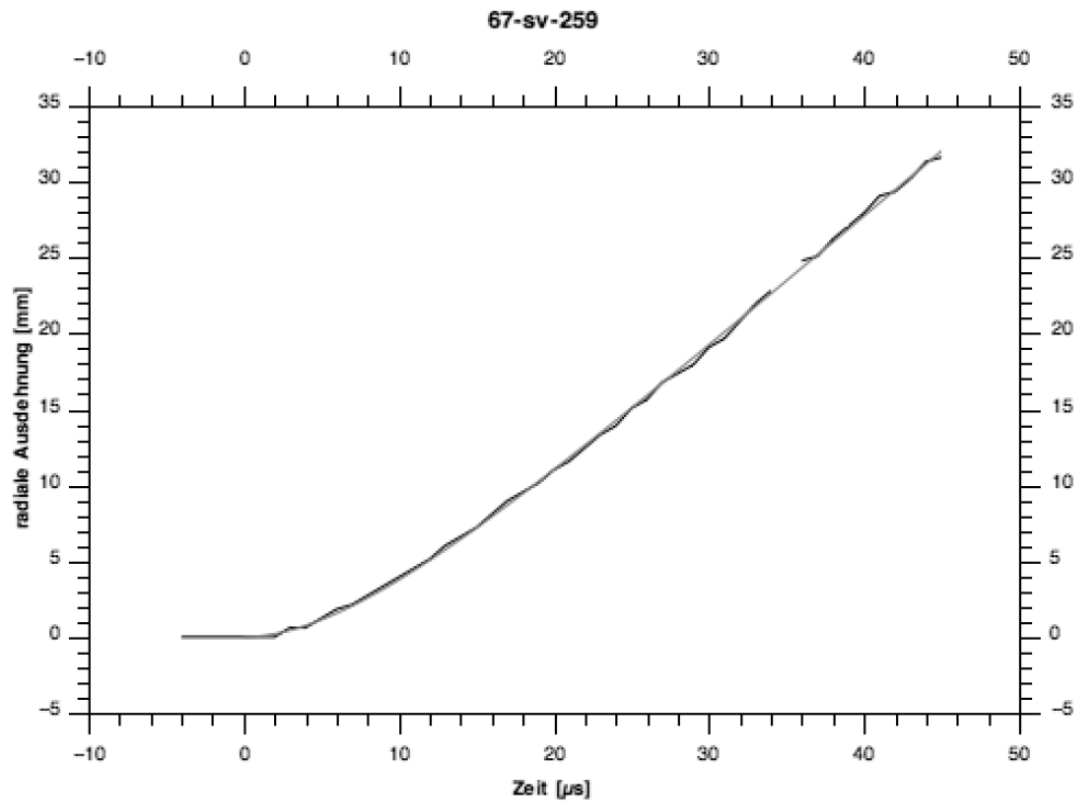
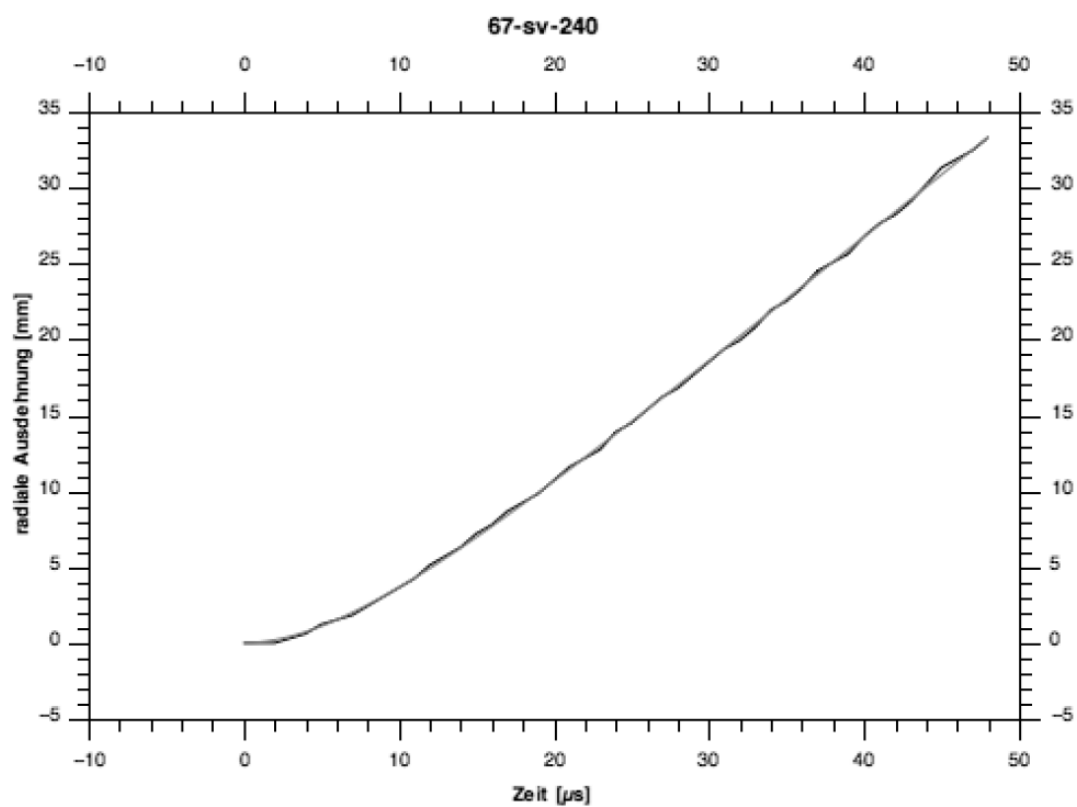


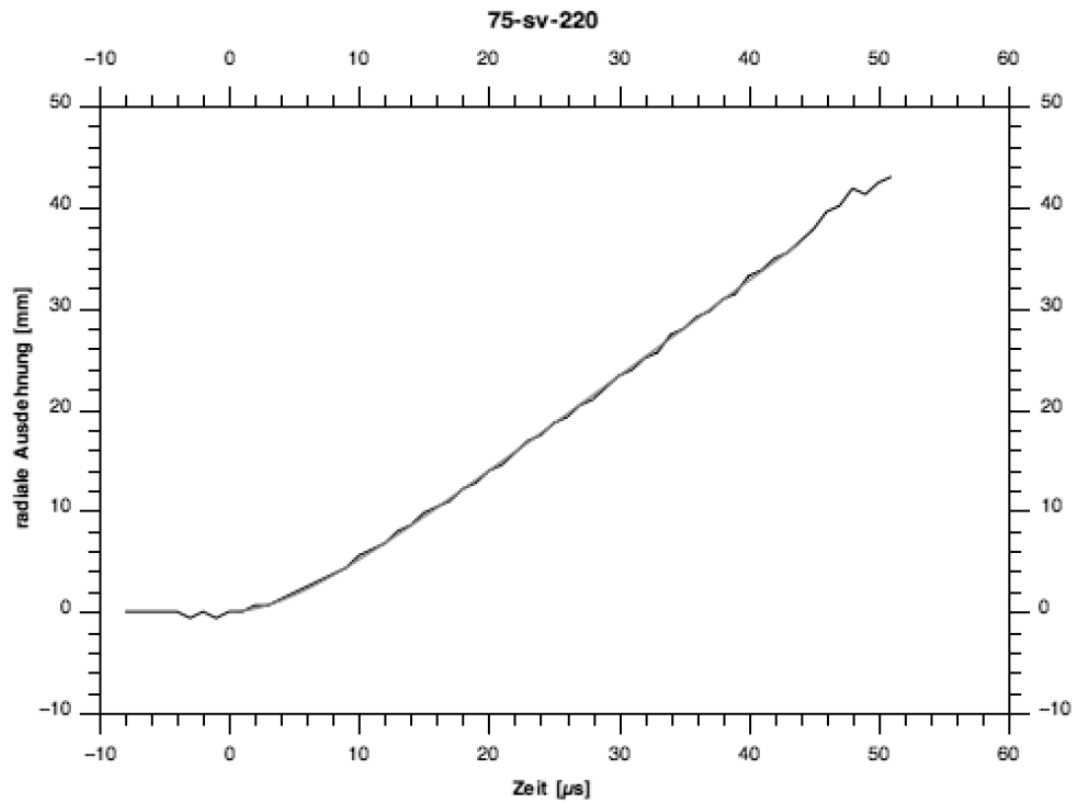
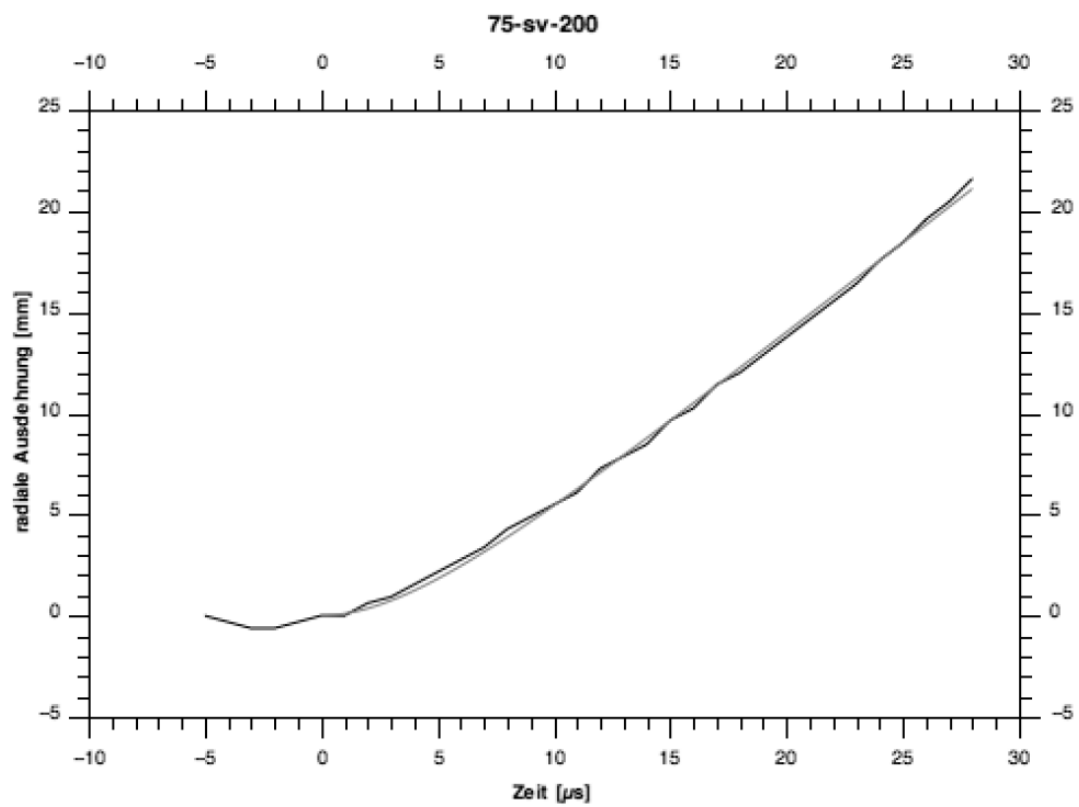


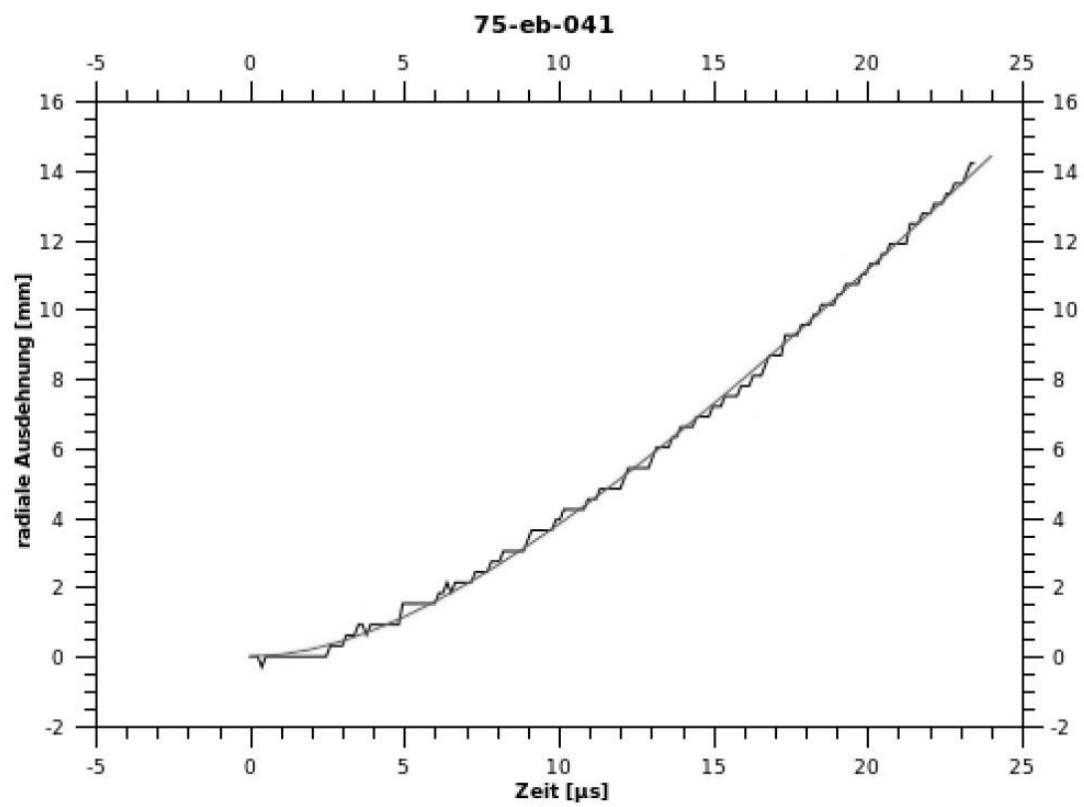
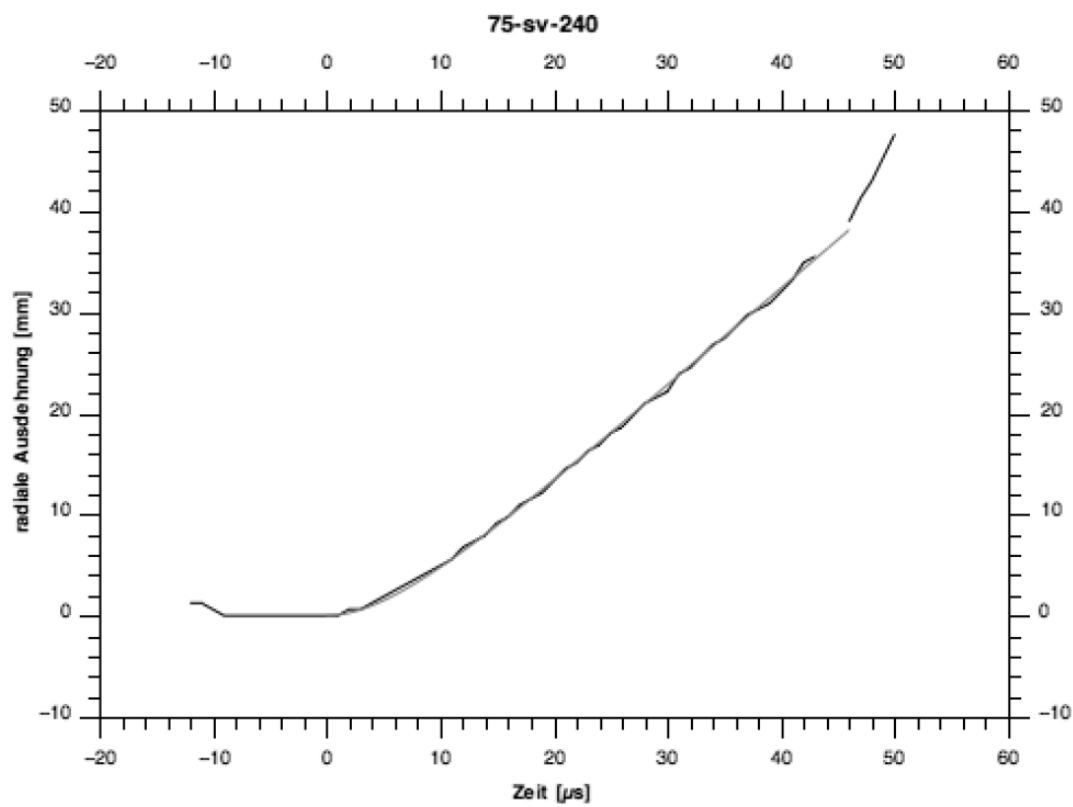


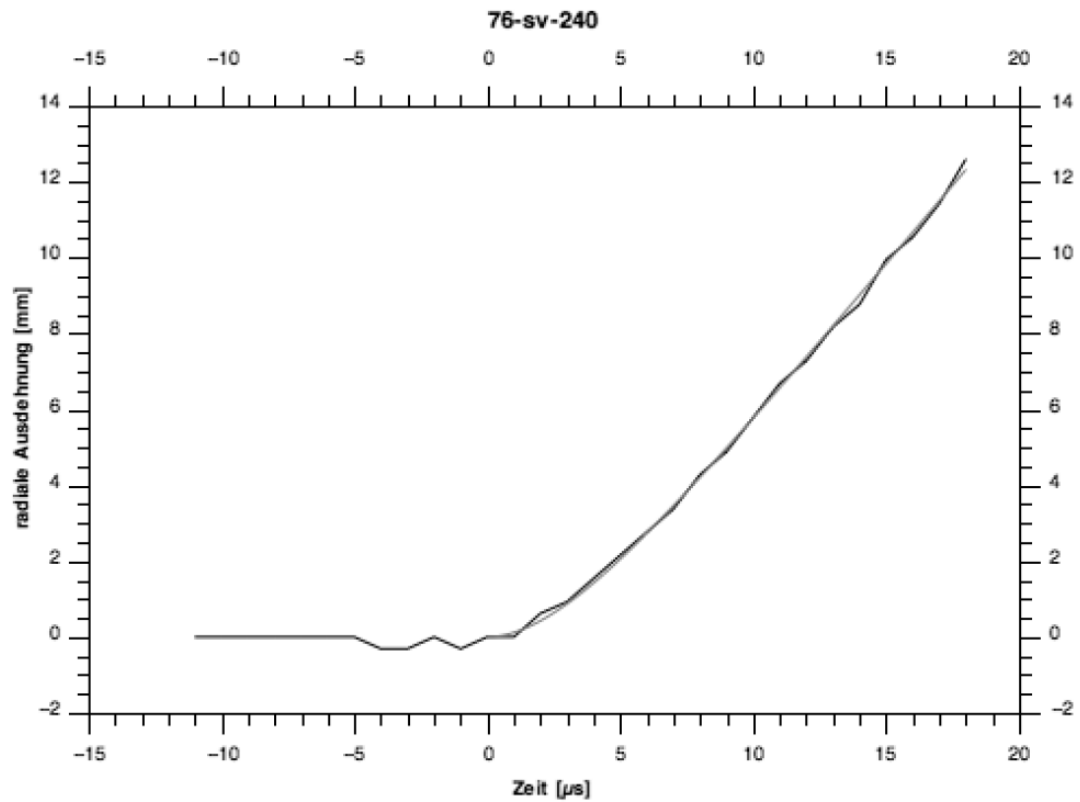
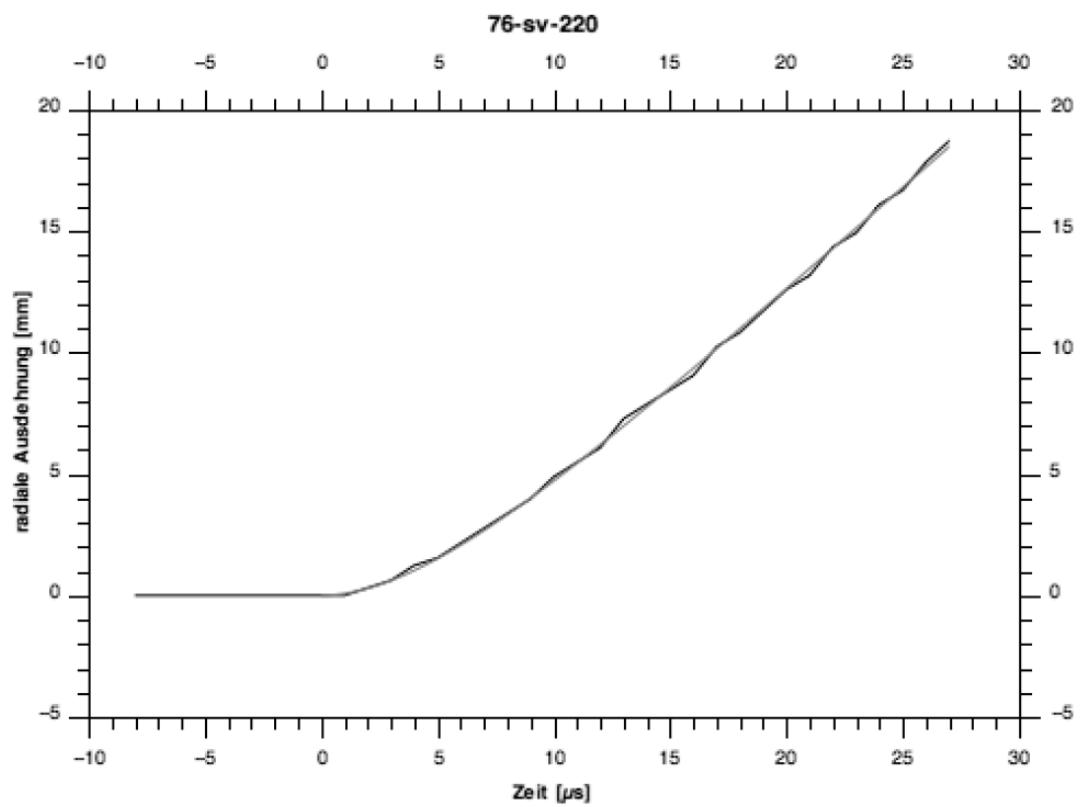


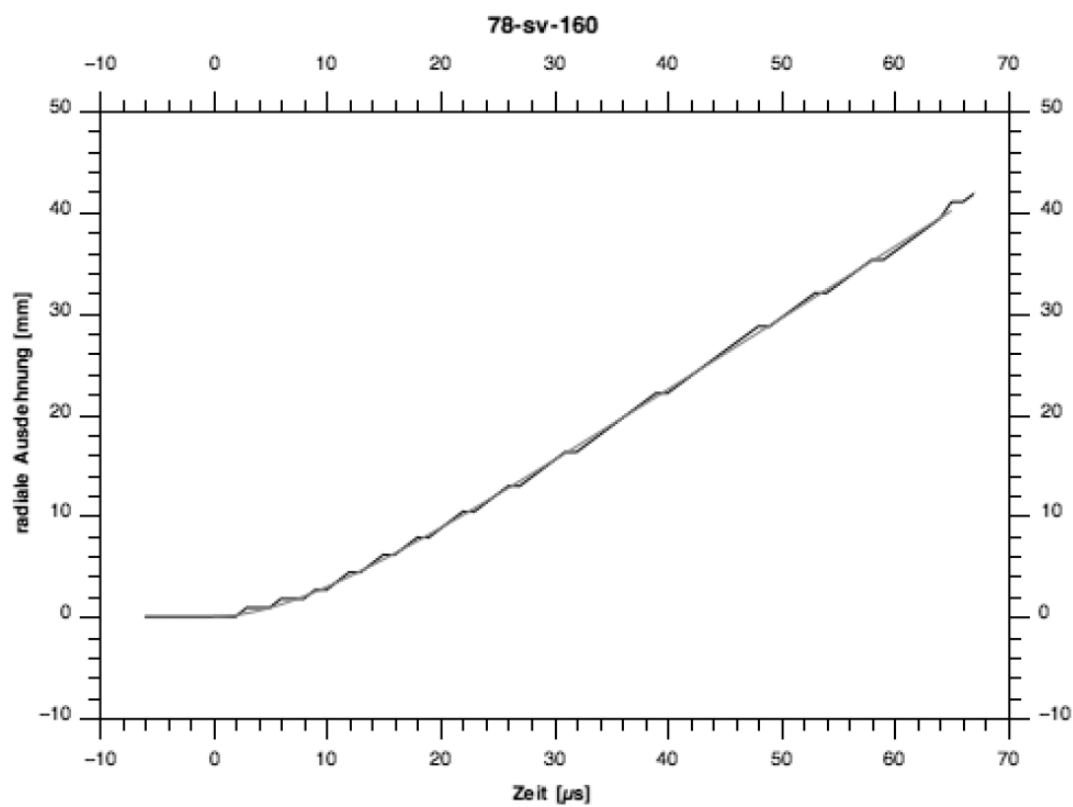
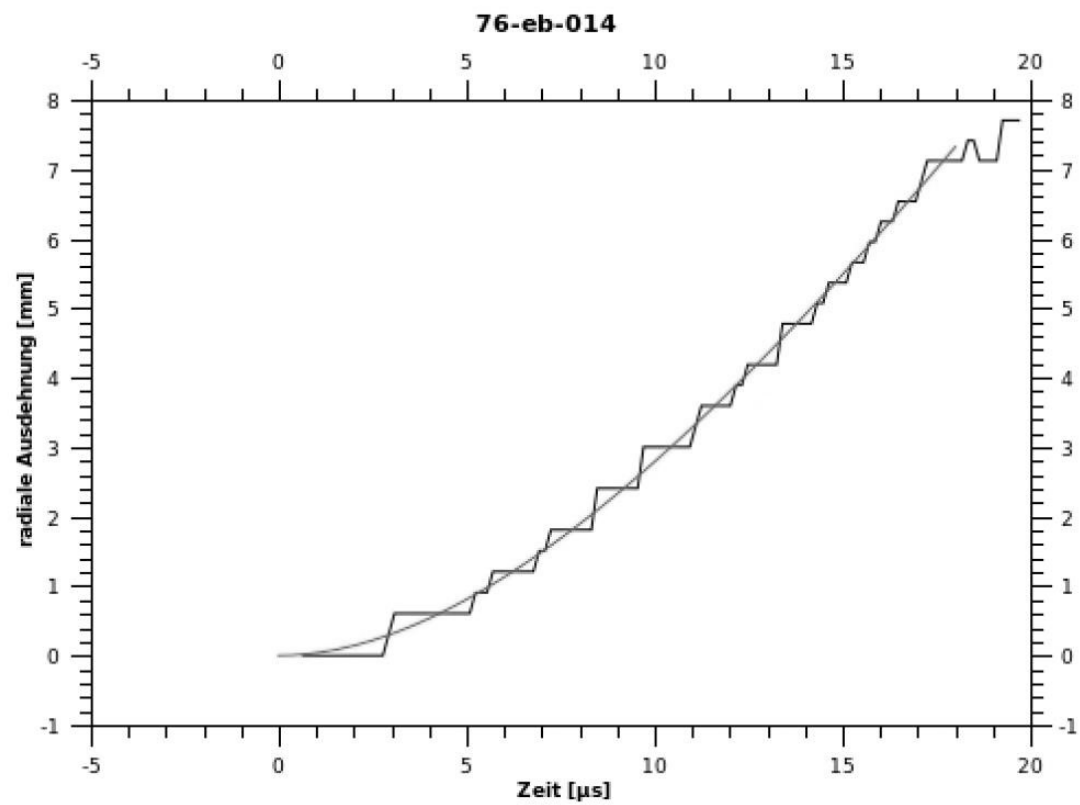


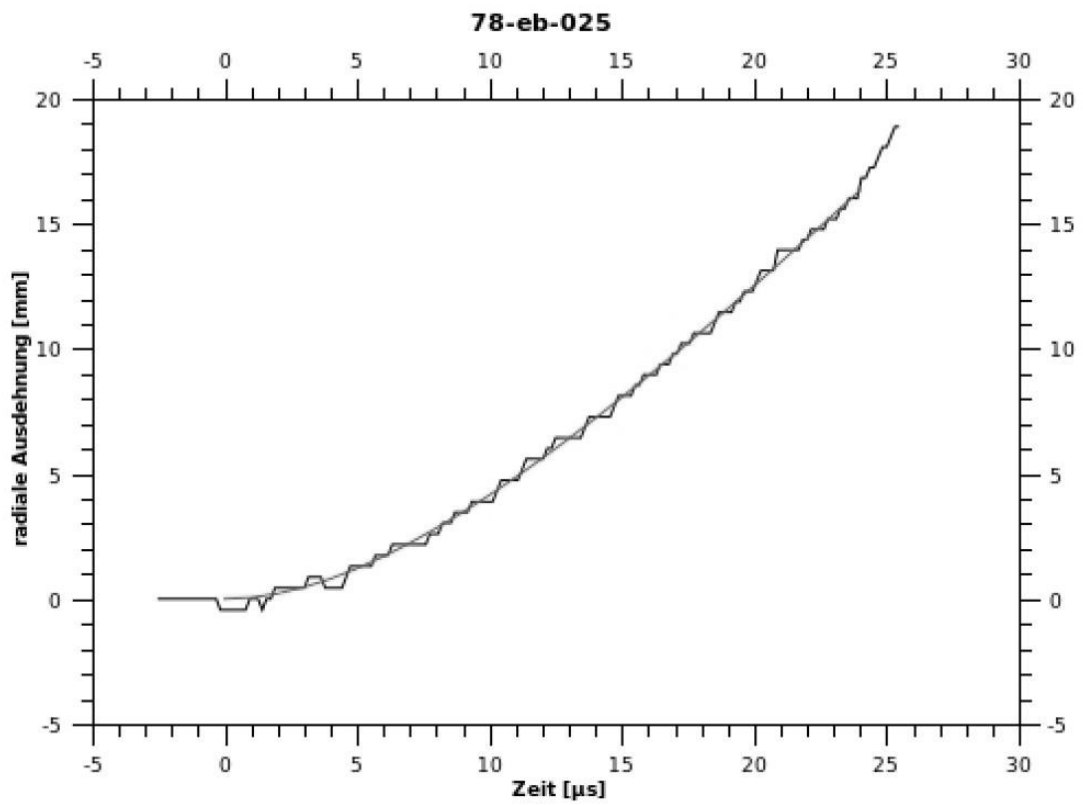
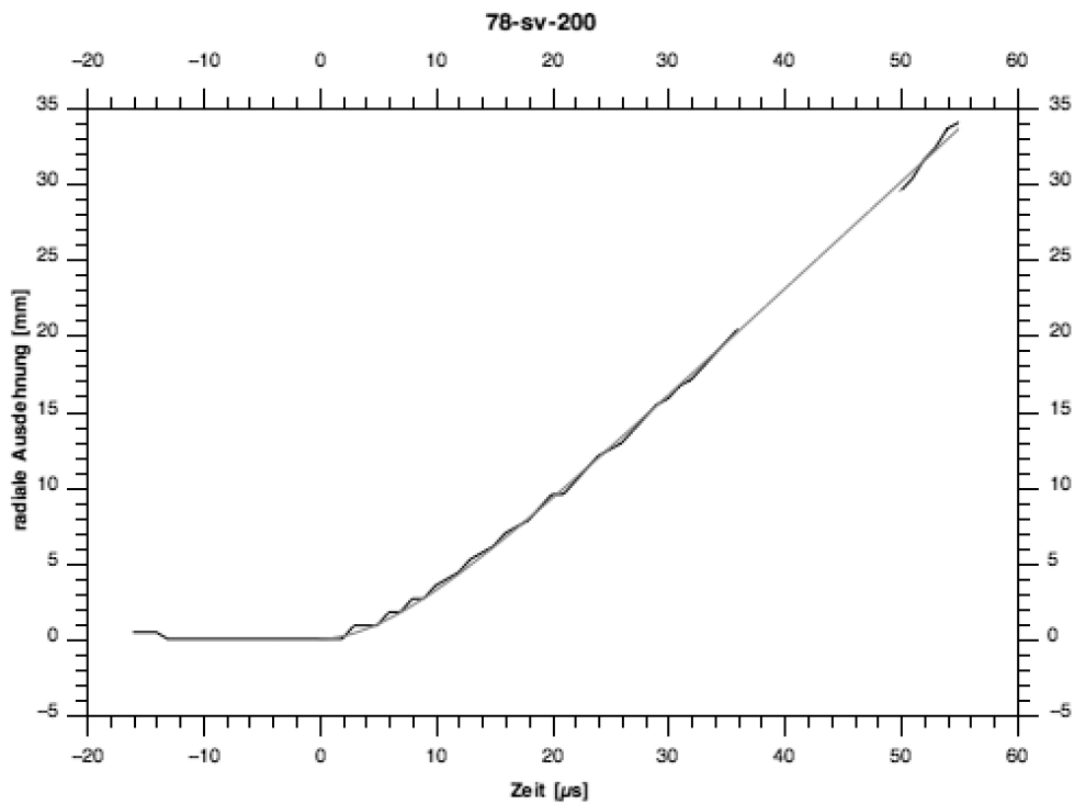


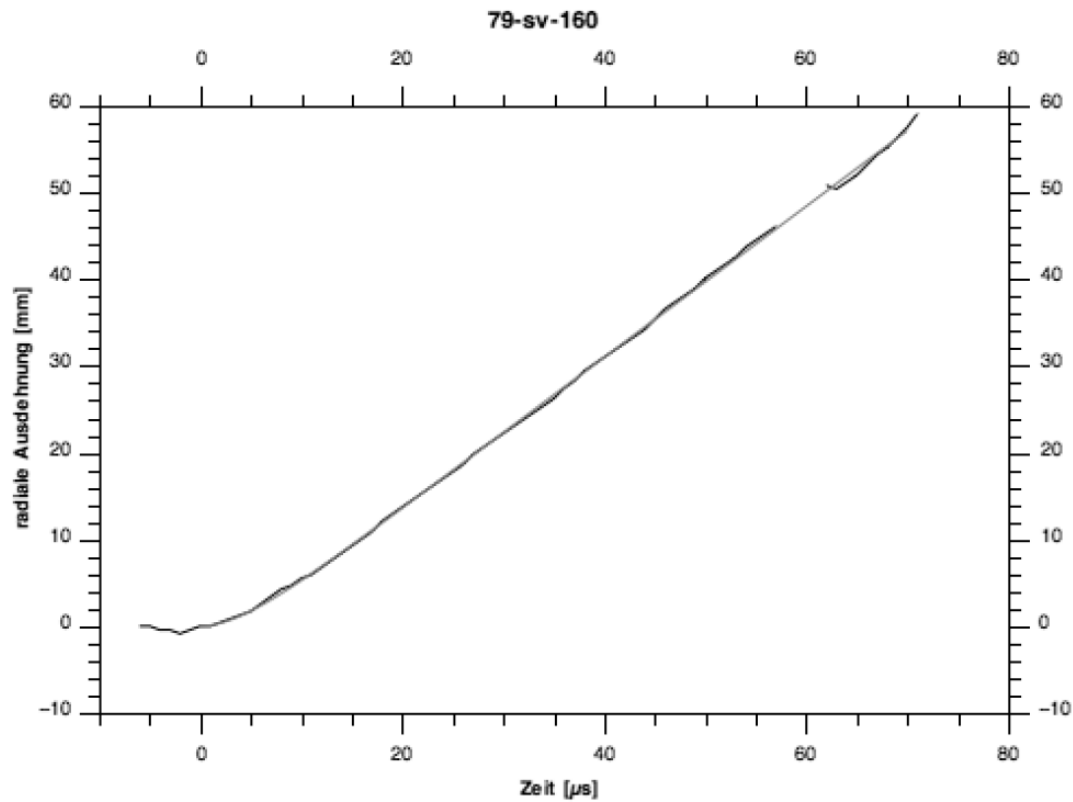
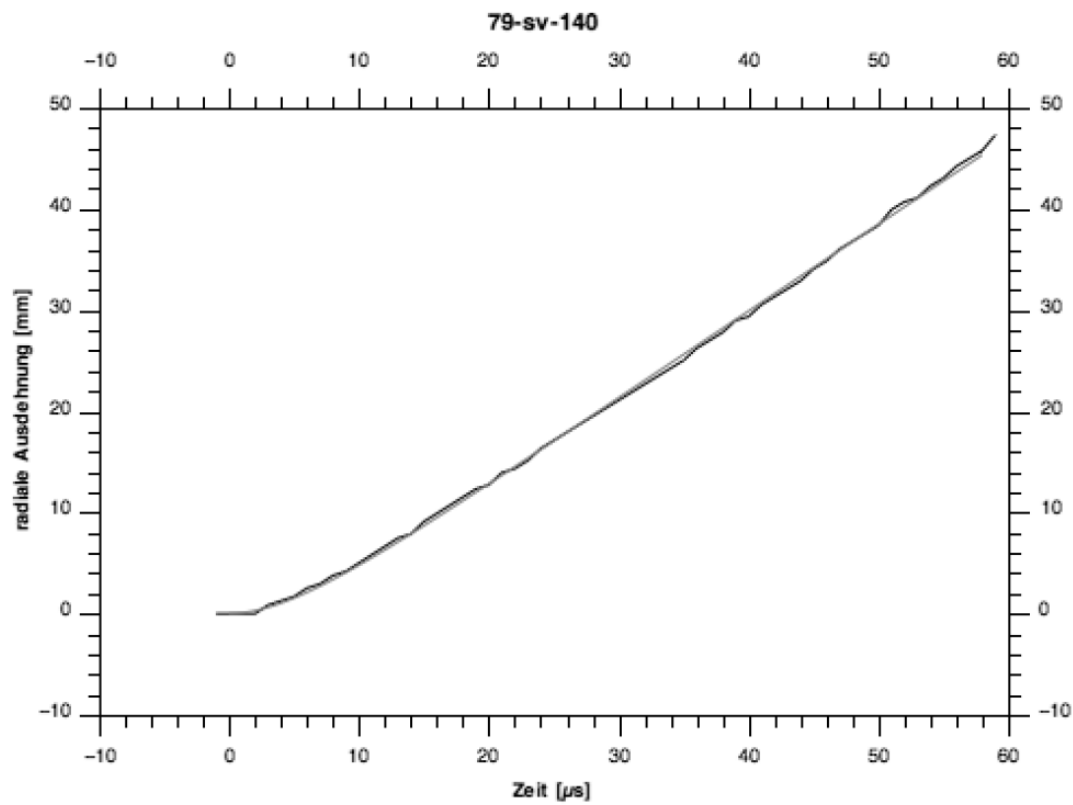












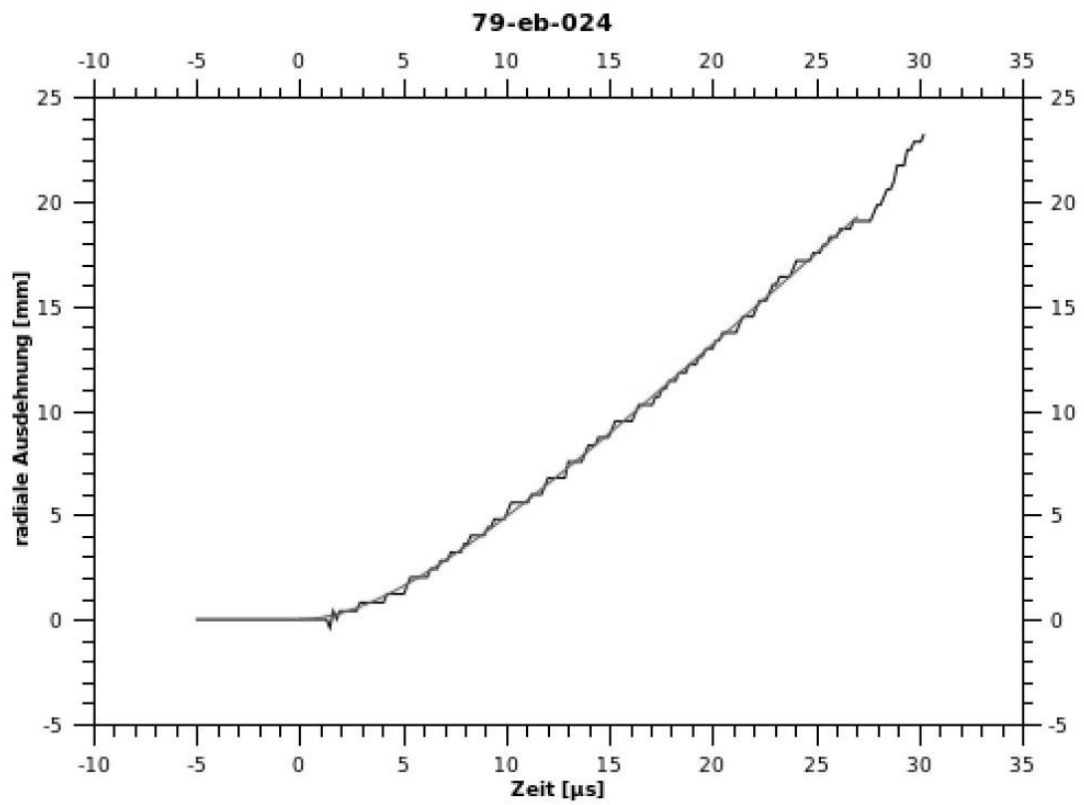
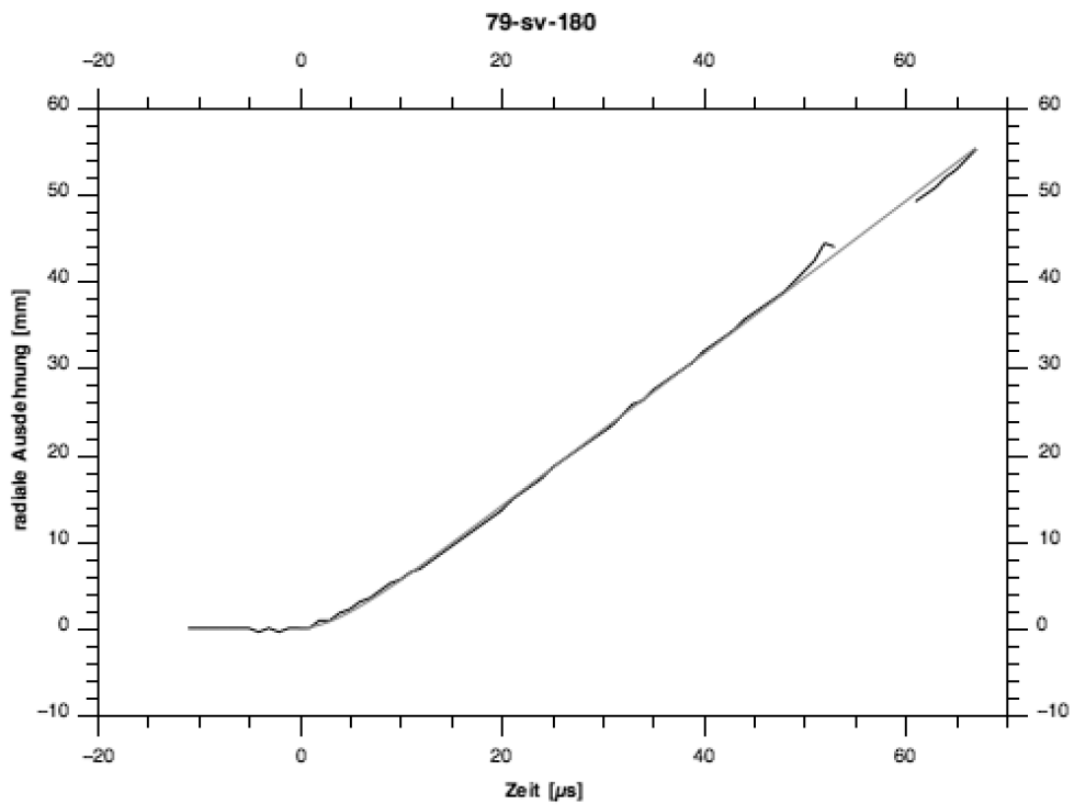


Tabelle 9.5: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Emu"

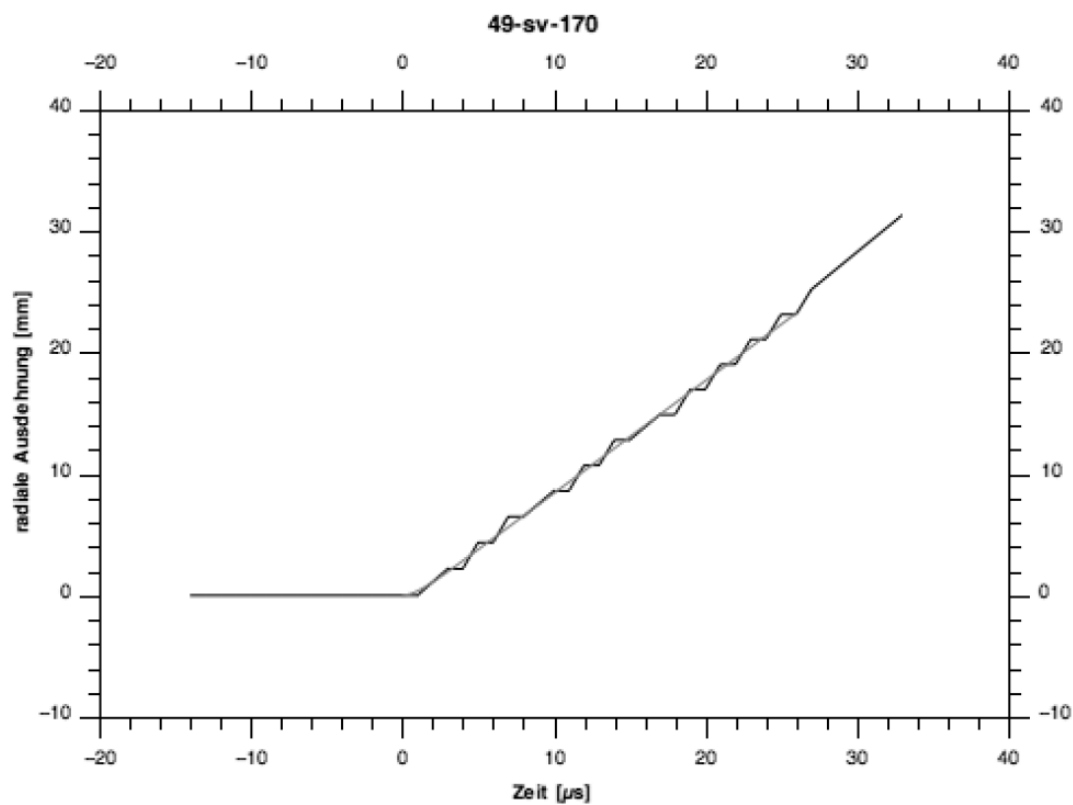
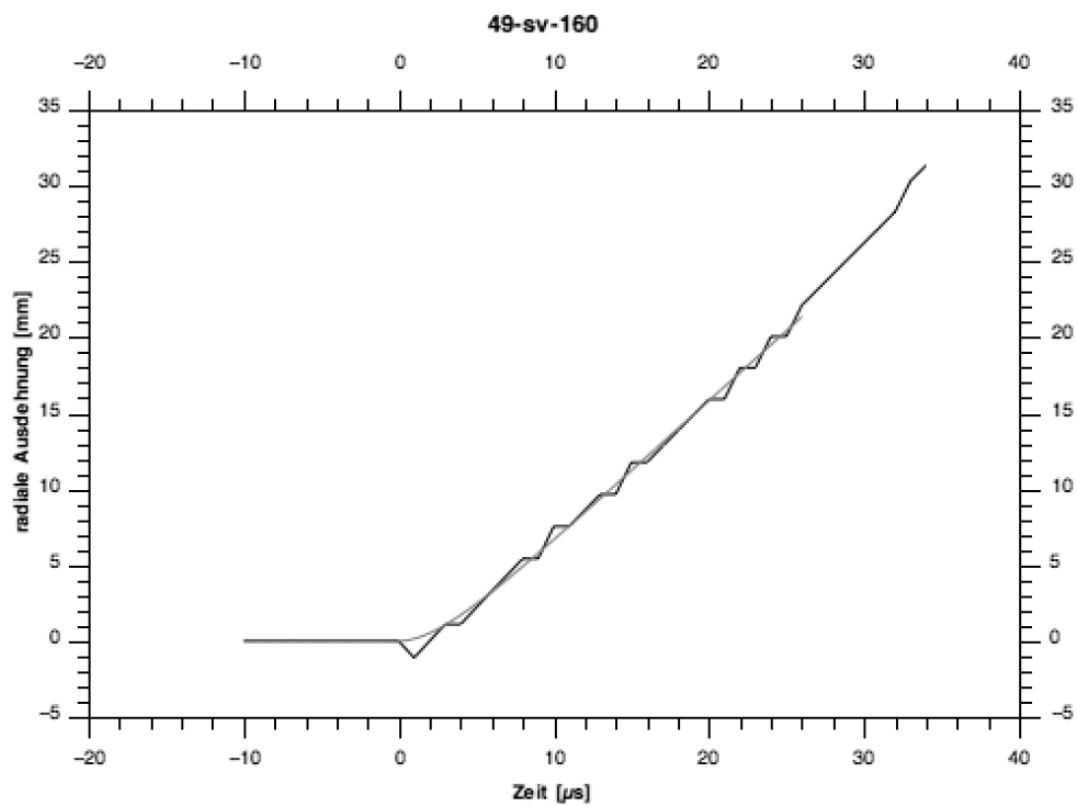
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter $\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/ μ s]	B_r [1/ μ s]
21	sv	120	0.81627	0.10404
		130	0.82610	0.12463
		140	0.82426	0.13852
22	sv	150	0.81993	0.13610
		110	0.79075	0.13378
		120	0.79535	0.16966
		130	0.79918	0.14873
23	sv	120	0.77547	0.11487
		130	0.77452	0.15481
		140	0.77775	0.08657
24	sv	120	0.98741	0.13631
		130	0.99077	0.13890
		150	0.97324	0.10726
25	sv	130	0.96797	0.11092
		140	0.96626	0.15117
		150	0.97817	0.14381
26	sv	120	0.94929	0.10046
		130	0.95859	0.11592
		140	0.94895	0.12975
		150	0.94922	0.10108
27	sv	130	0.86160	0.22207
28	sv	120	0.95295	0.15726
		130	0.95511	0.12962
		140	0.95129	0.11231

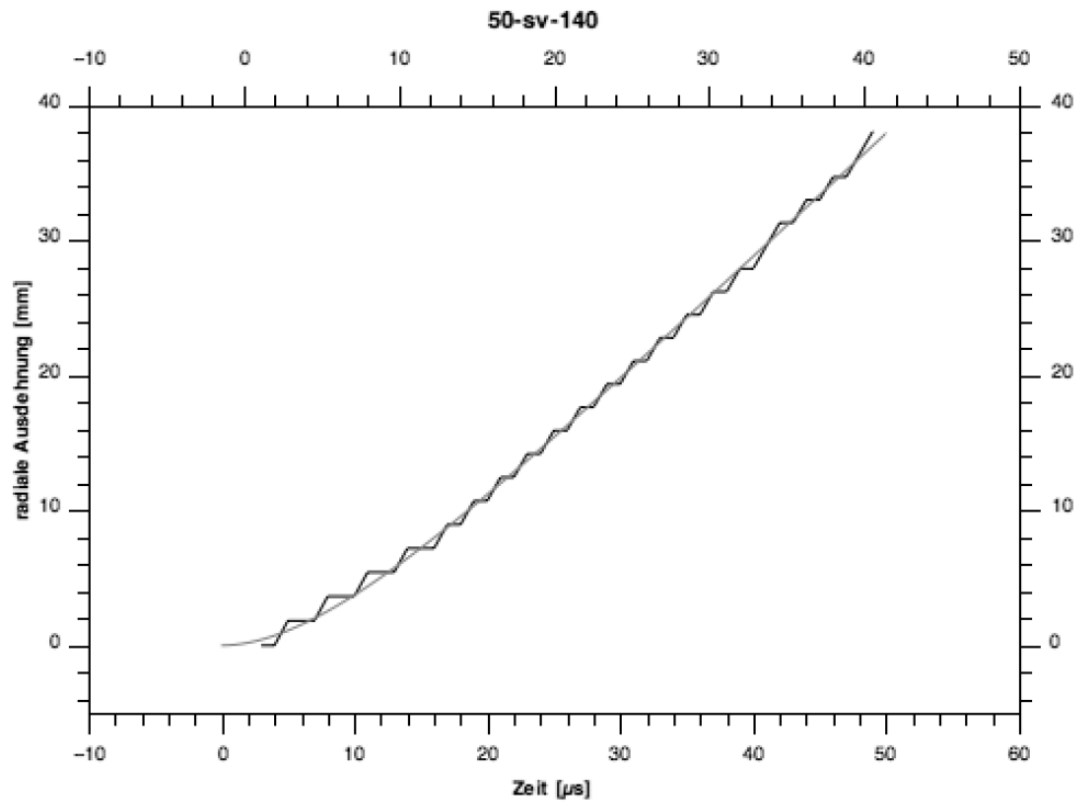
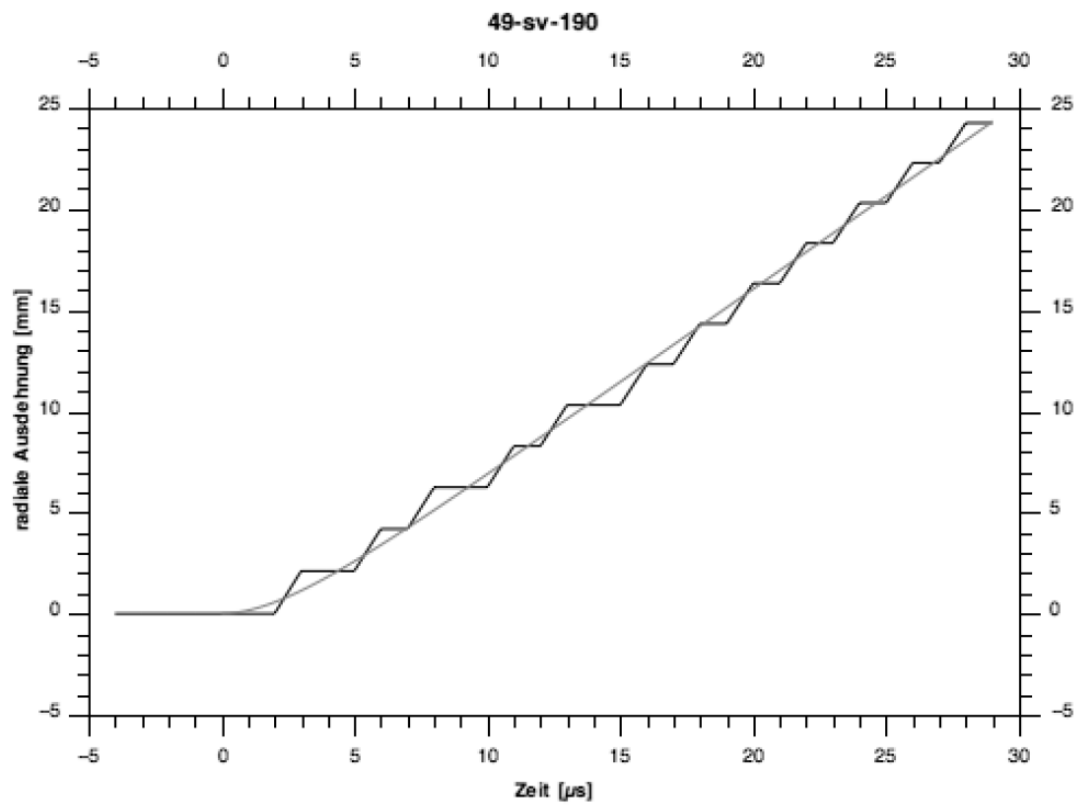
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter	
			$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/μs]	B_r [1/μs]
29	sv	140	1.04519	0.11944
		150	0.99186	0.11837
		160	0.99002	0.16859
30	sv	160	1.01363	0.10086
		170	0.99167	0.13009
		180	1.34439	0.05941
34	sv	120	0.94629	0.09064
		130	0.96949	0.09959
		140	0.94004	0.08596
		150	0.94675	0.08908
37	sv	140	0.85120	0.19922
		150	0.85053	0.12708
		160	0.99822	0.11237
38	kein auswertbarer Film			
40	sv	130	0.82775	0.12771
		150	0.83080	0.11330
		160	0.85711	0.13568
41	sv	120	0.85119	0.08260
		130	0.86026	0.10445
		140	0.85779	0.11151
42	sv	110	0.83231	0.10871
		130	0.83865	0.11119
		140	0.84068	0.09498

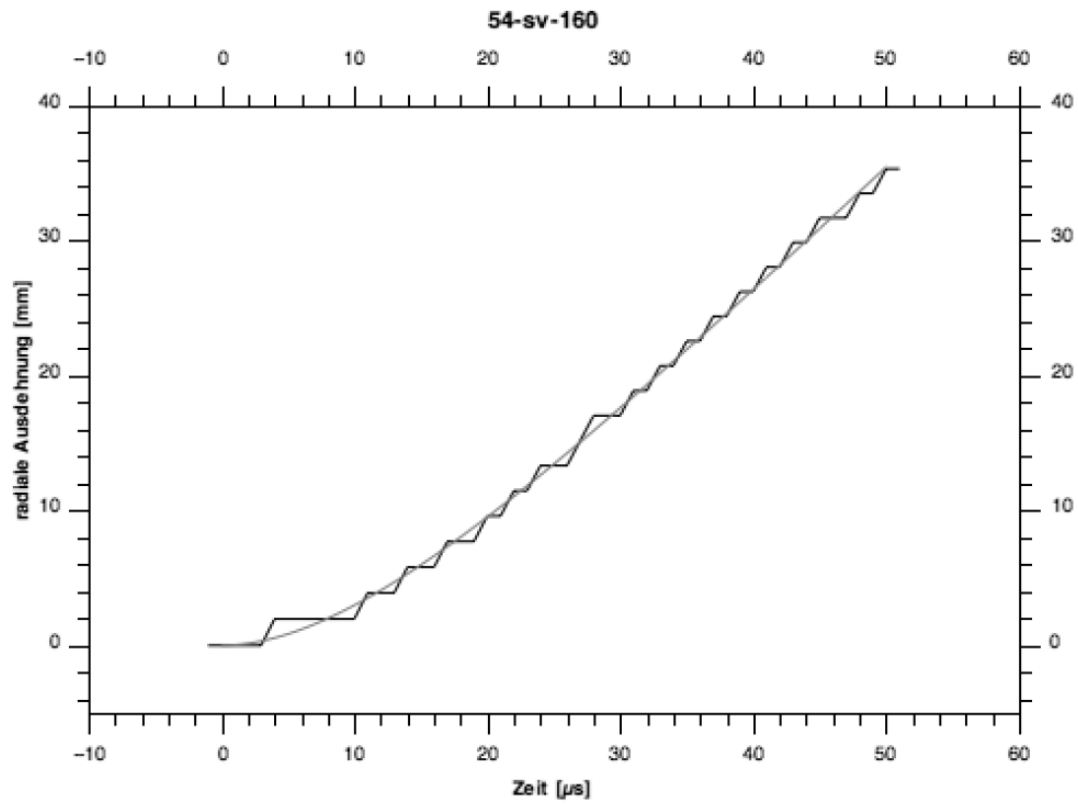
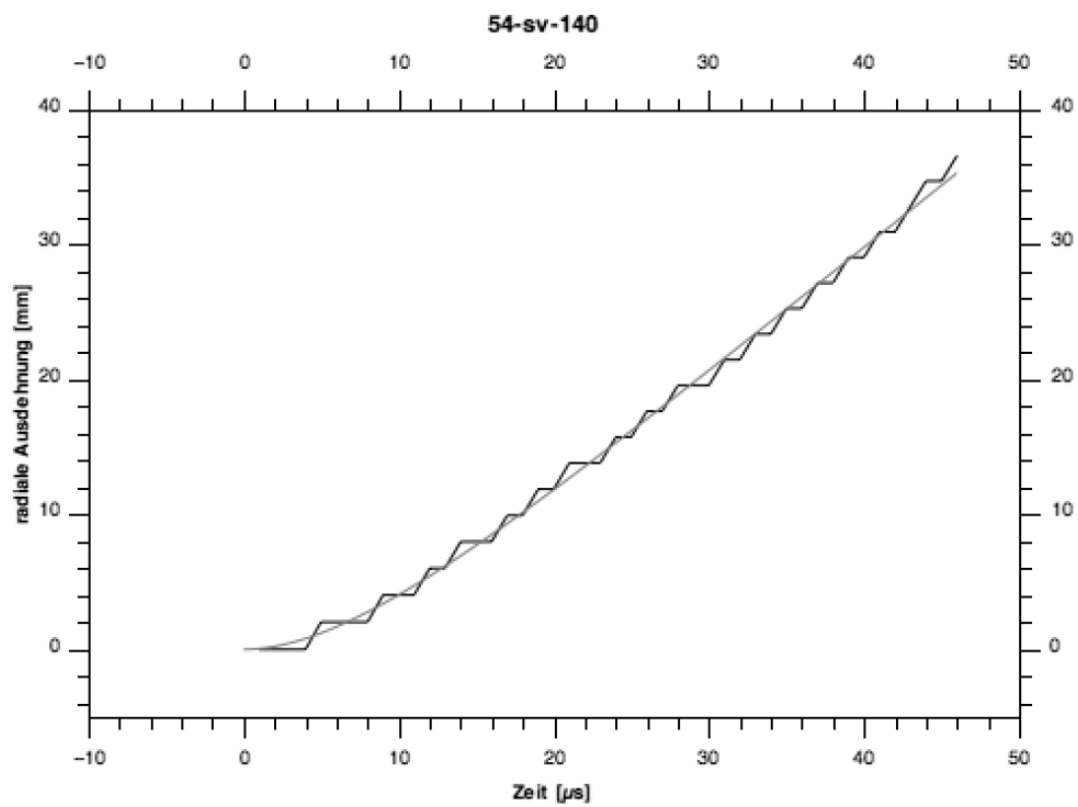
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter $\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/μs]	B_r [1/μs]
43	sv	110	0.78422	0.14225
		120	0.78406	0.10877
		130	0.79767	0.09757
44	sv	120	0.83363	0.14367
		130	0.84231	0.15003
		140	0.84565	0.12854
45	sv	110	0.99541	0.06309
		120	0.85603	0.09171
		130	1.00684	0.05874
		140	1.00144	0.06281
46	sv	100	0.75819	0.11015
		120	0.74631	0.10904
		140	0.74978	0.12748
47	sv	130	0.93163	0.10568
		140	0.93399	0.13669
		150	0.81735	0.25328
48	sv	130	0.93208	0.07379
		140	1.05635	0.05471
63	kein Film			
65	sv	80	0.78301	0.13250
		140	0.78452	0.11656
		180	0.78185	0.14501
	eb	052	0.74859	0.14340
		058	0.63700	0.18550
		062	0.72301	0.15333

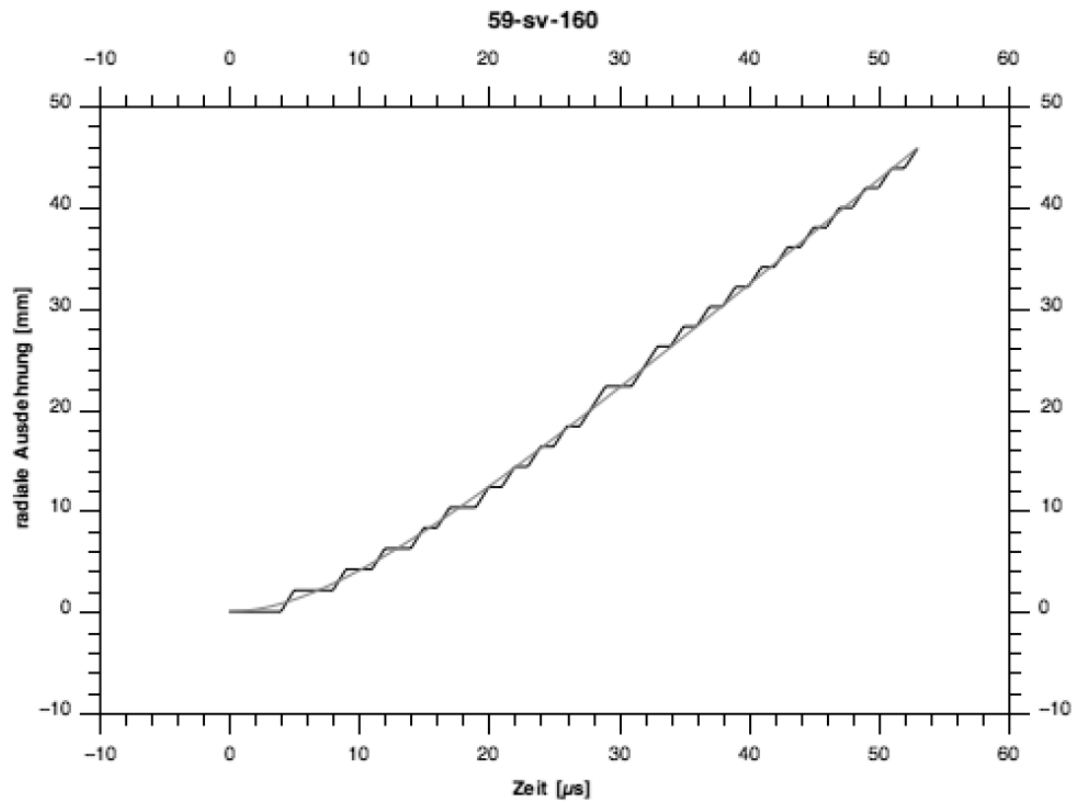
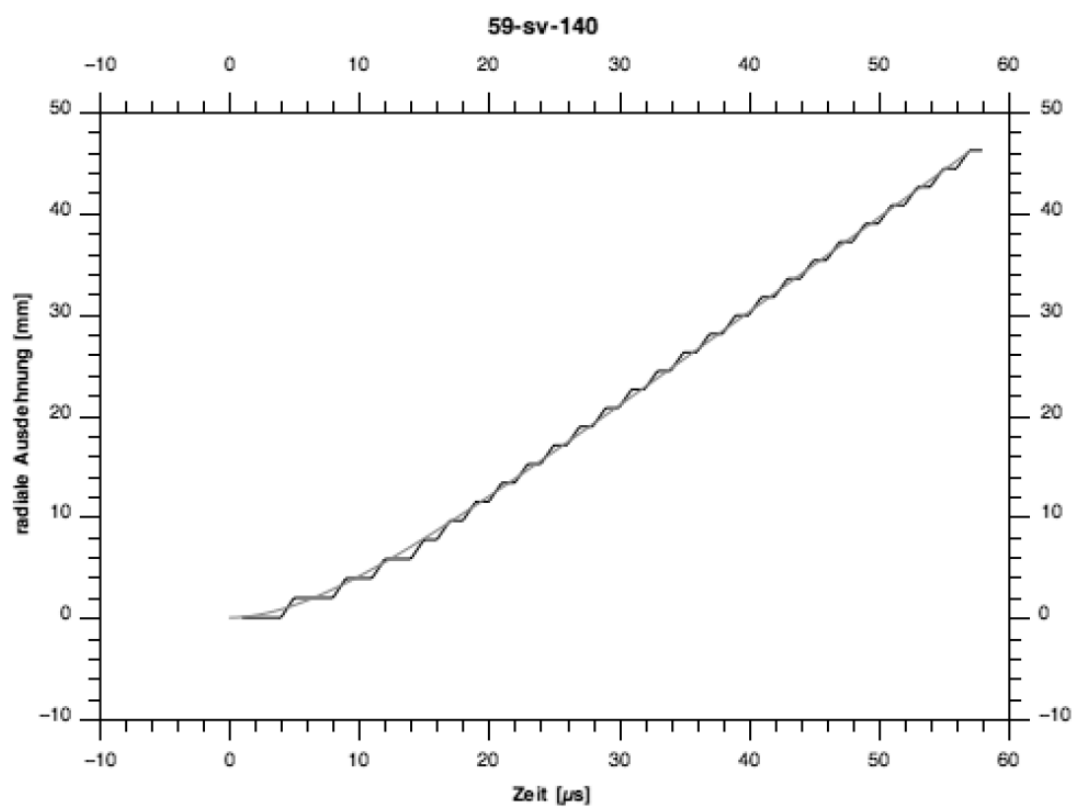
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter	
			$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/μs]	B_r [1/μs]
66	sv	140	0.84312	0.13521
		180	0.82231	0.10514
		200	0.82508	0.10918
		062	0.82861	0.07843
67		230	0.80513	0.13650
		240	0.80867	0.13852
		259	0.80909	0.14923
75	sv	200	0.89058	0.23193
		220	0.94488	0.18524
		240	0.96029	0.15869
	eb	041	0.86683	0.12919
76	sv	220	0.84576	0.19346
		240	0.83230	0.31168
	eb	014	0.75904	0.09983
77	kein auswertbarer Film			
78	sv	160	0.70954	0.11801
		200	0.70632	0.13522
	eb	025	1.04273	0.11177
79	sv	140	0.85804	0.19437
		160	0.87086	0.22723
		180	0.87987	0.24495
	eb	024	0.88009	0.19315
80	kein Film			
81	kein Film			

9.2.5. "Dumbo", Mikrohohlkörper, BAM









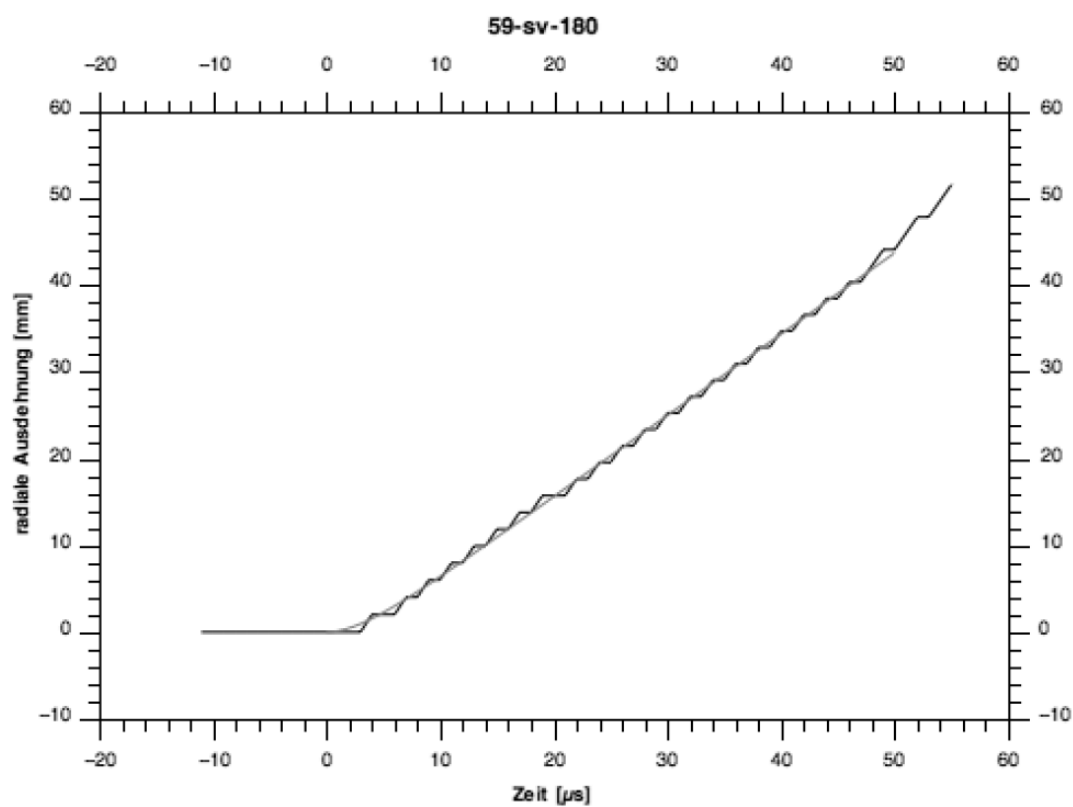
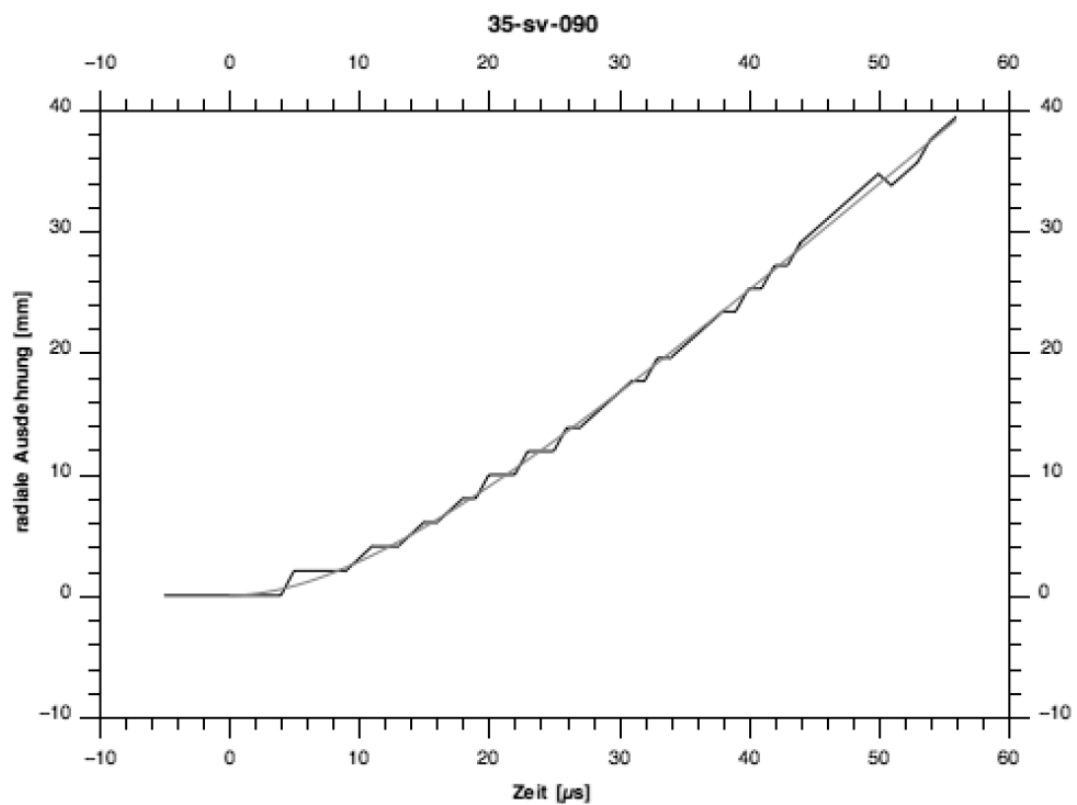
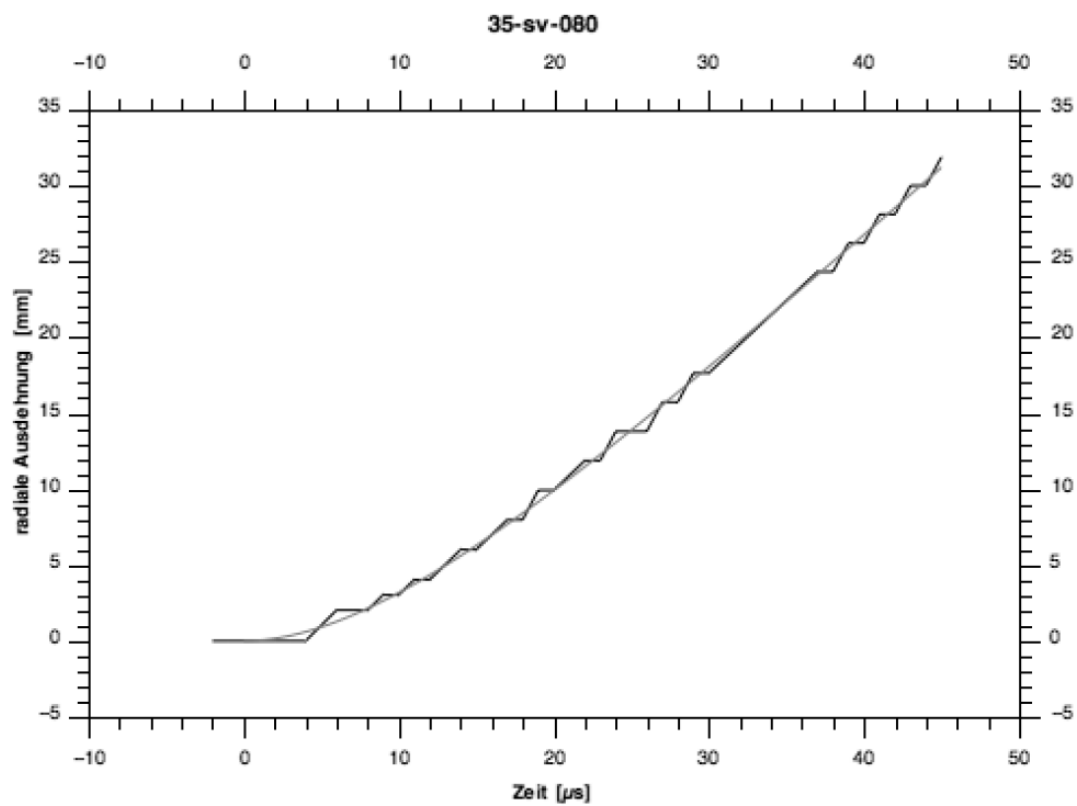
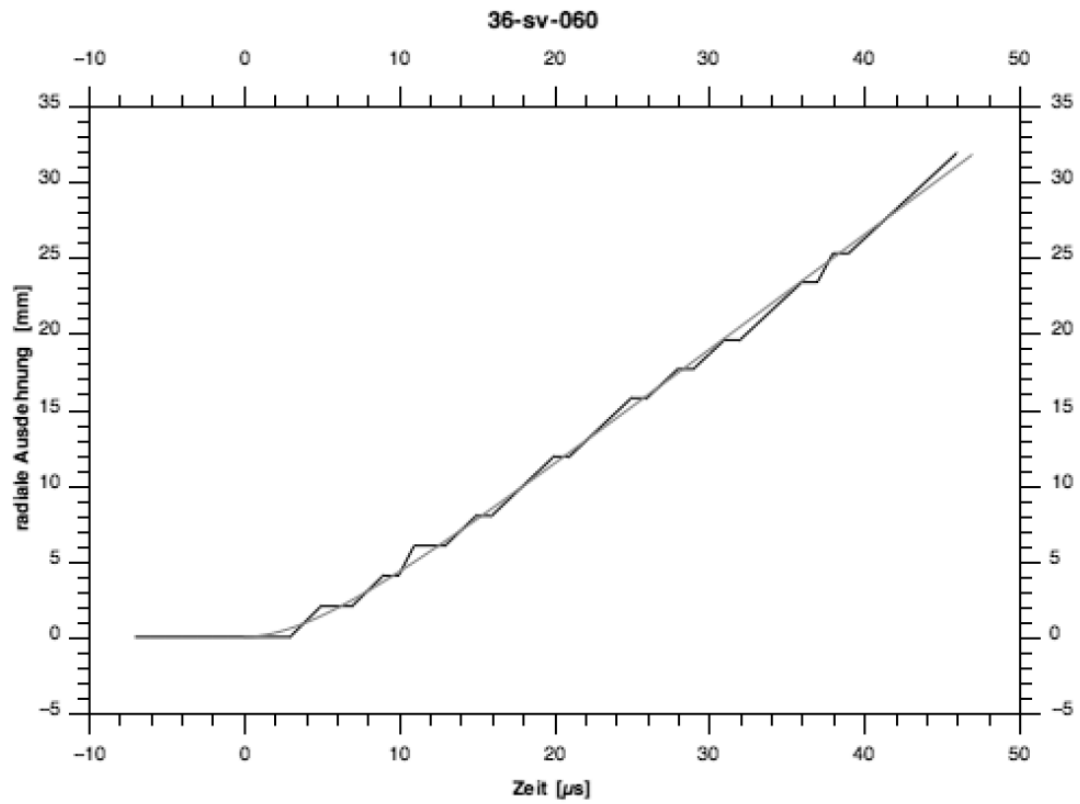
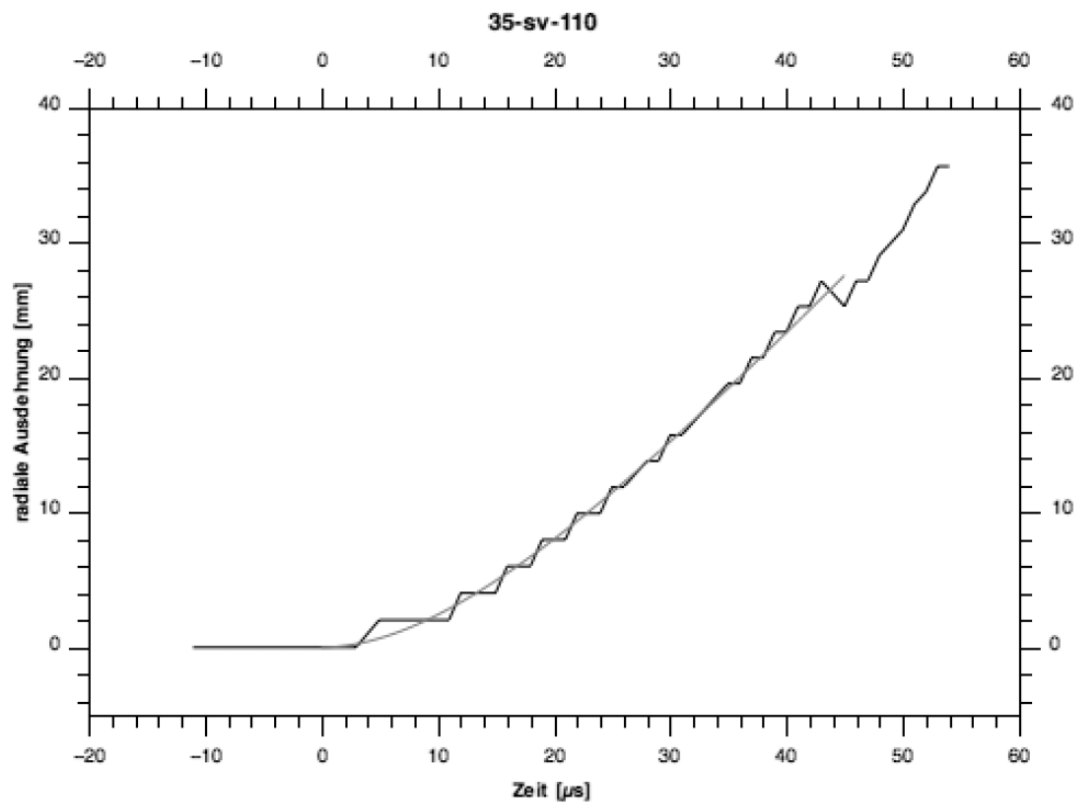


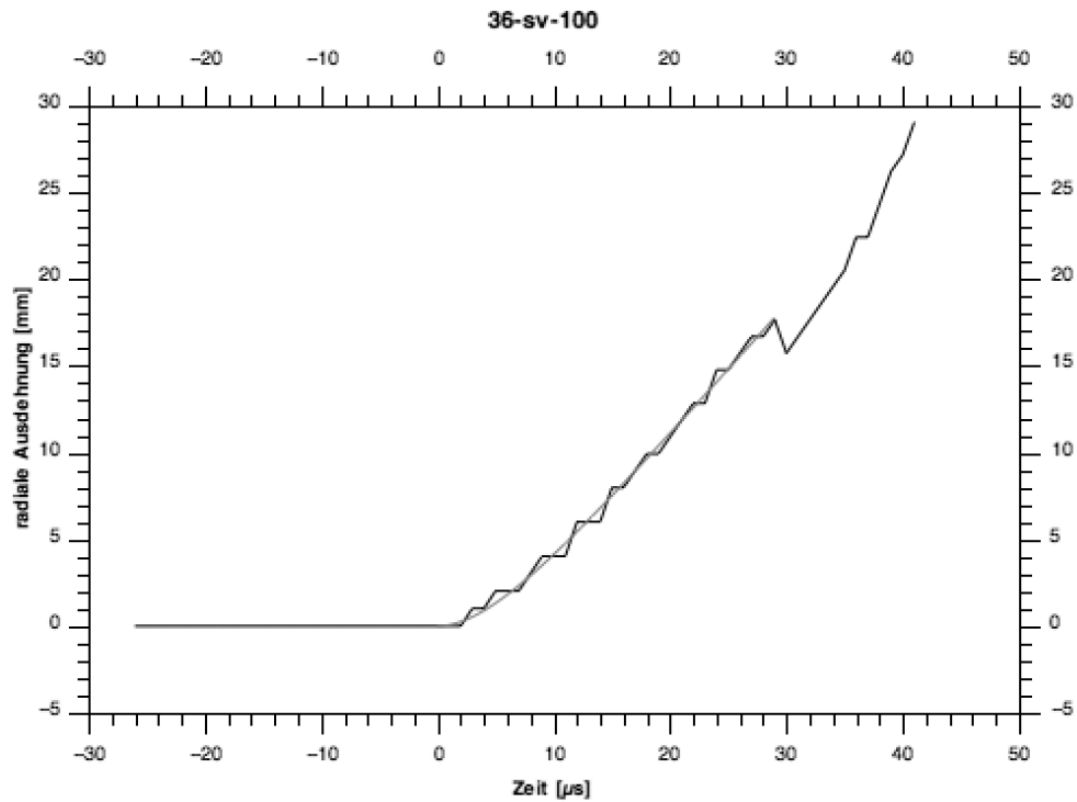
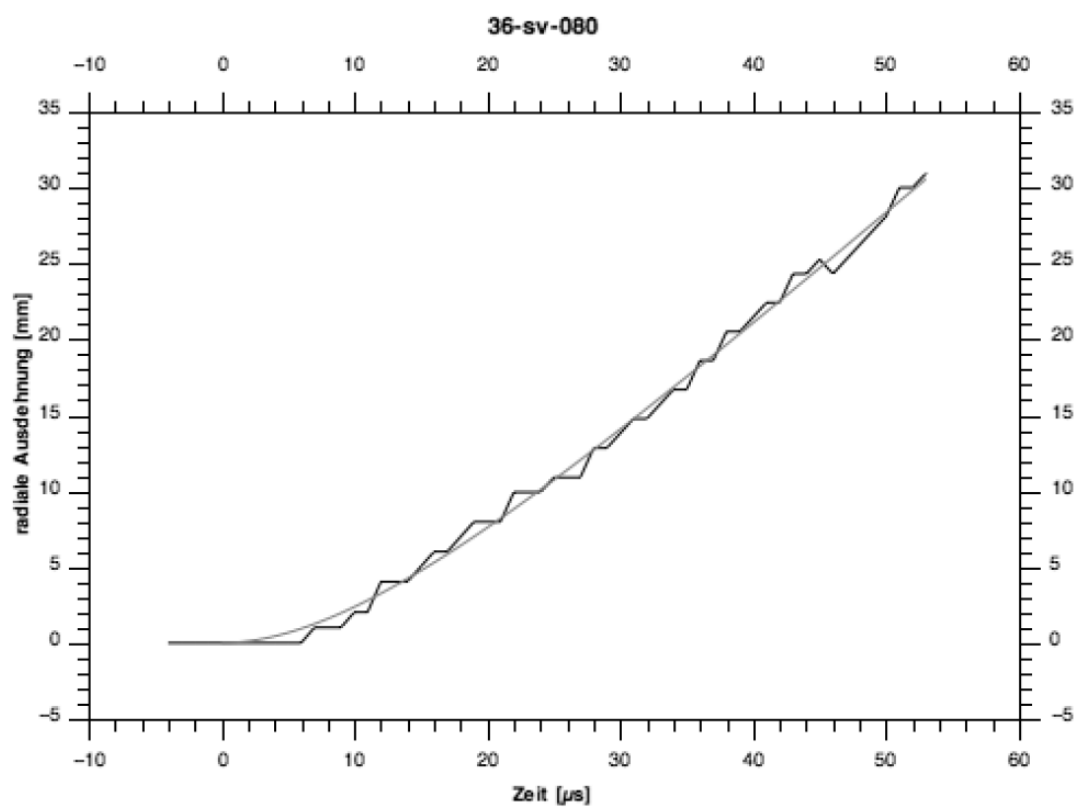
Tabelle 9.6: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Dumbo"

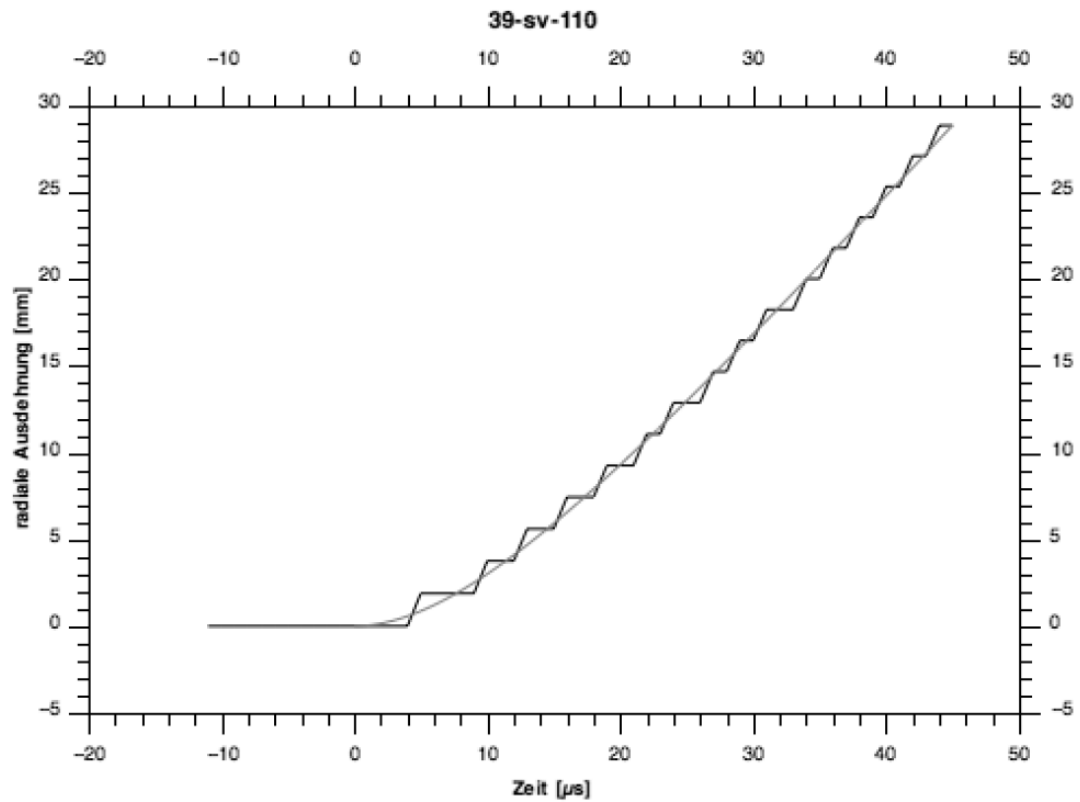
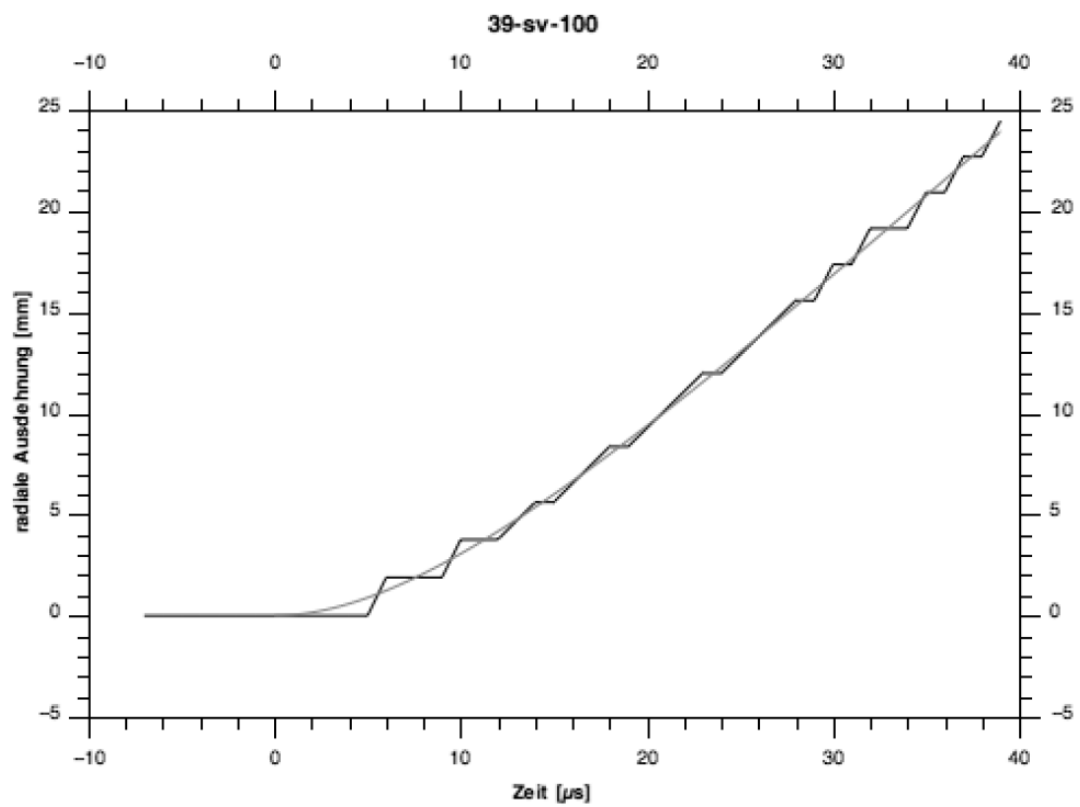
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilenr./ Bildnr.	Fitting - Parameter $\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/ μ s]	B_r [1/ μ s]
49	sv	160	0.92266	0.35125
		170	0.92733	1.06672
		190	0.91906	0.39292
50	sv	140	0.91848	0.11503
54	sv	140	0.92346	0.12873
		160	0.93080	0.08267
55	kein Film			
56	kein Film			
58	kein Film			
59	sv	140	0.93596	0.12824
		160	1.04671	0.10801
		180	0.93729	0.29957

9.2.6. "TNT, geschuppt", ELOVITZA









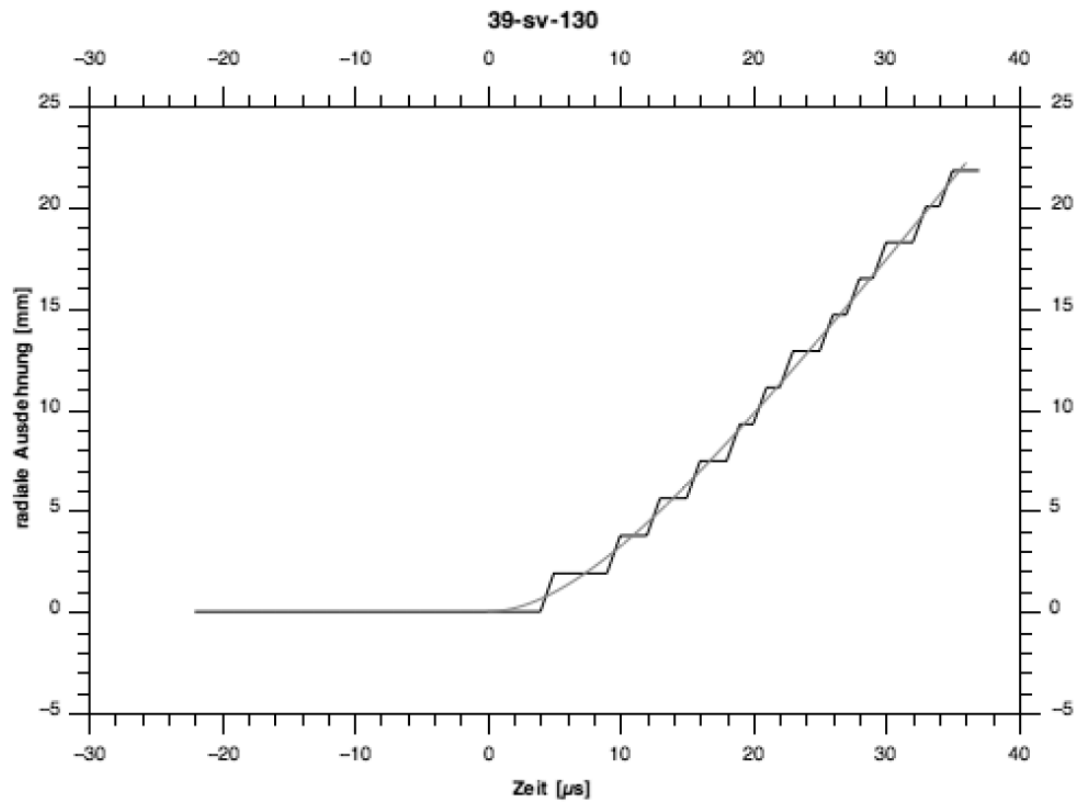
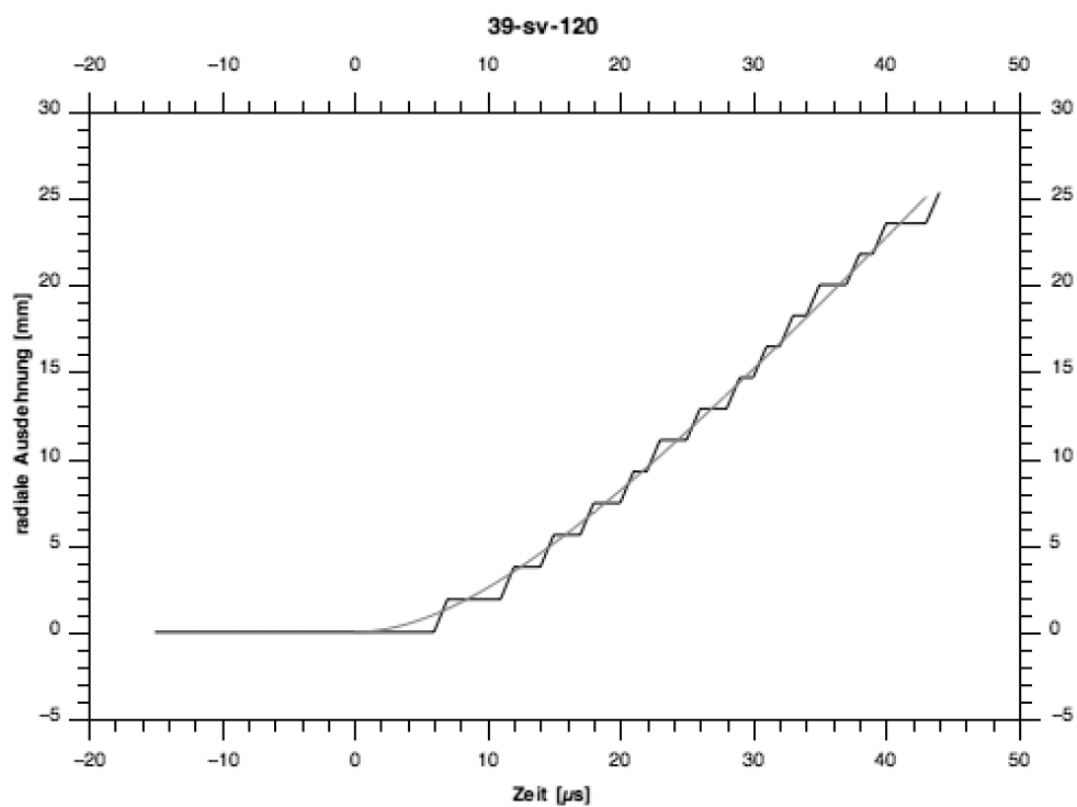
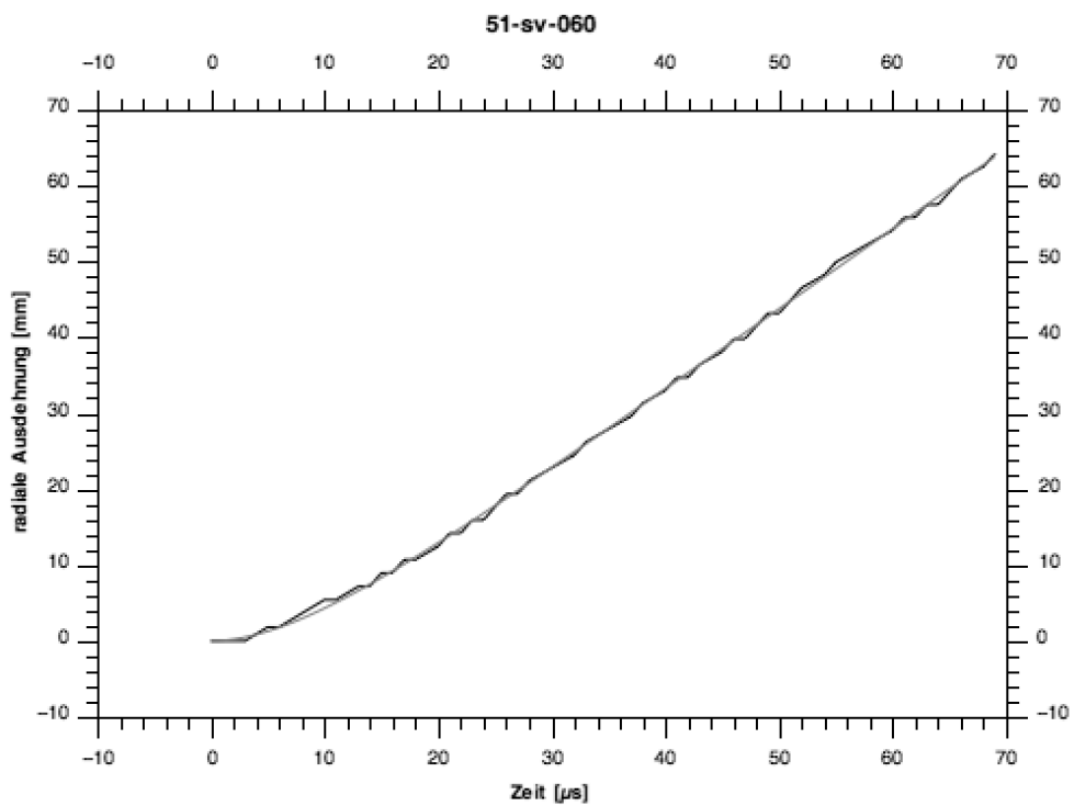
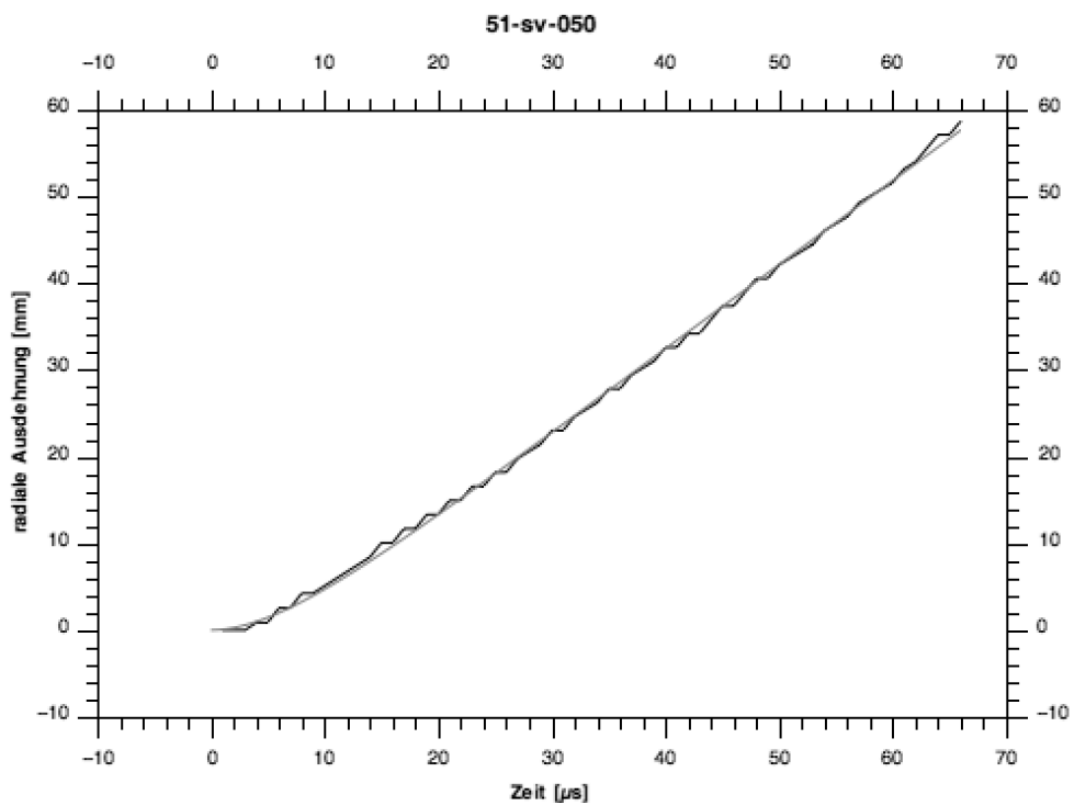
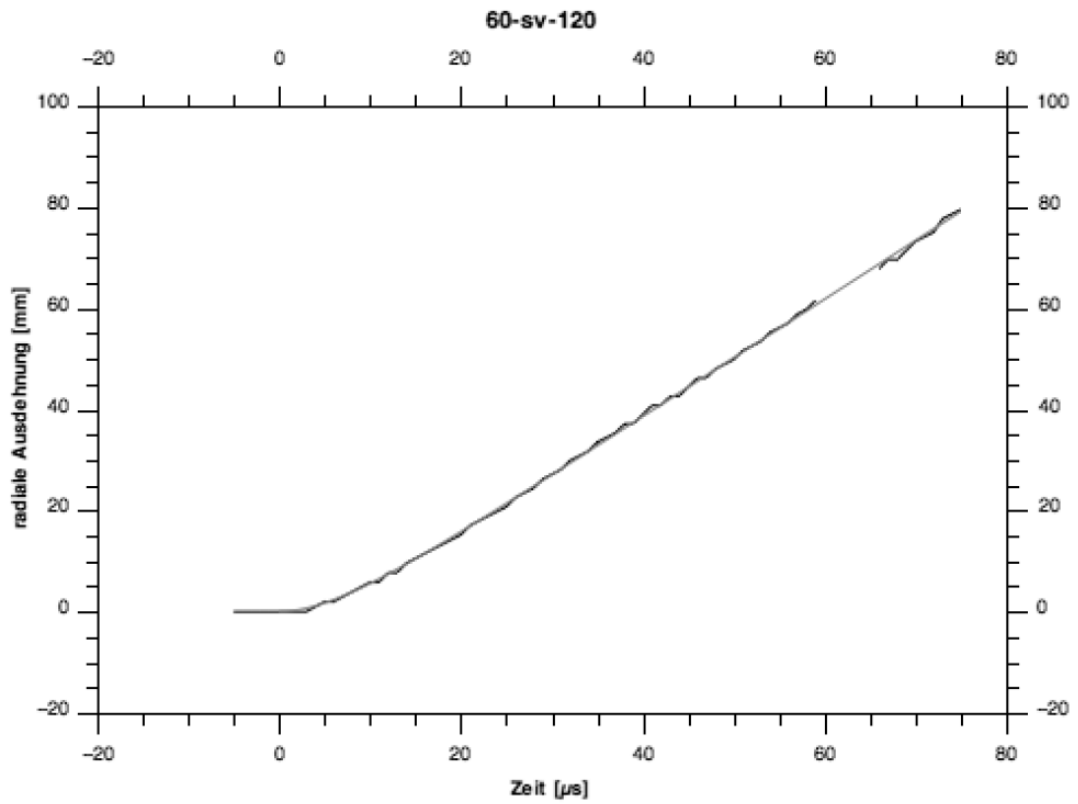
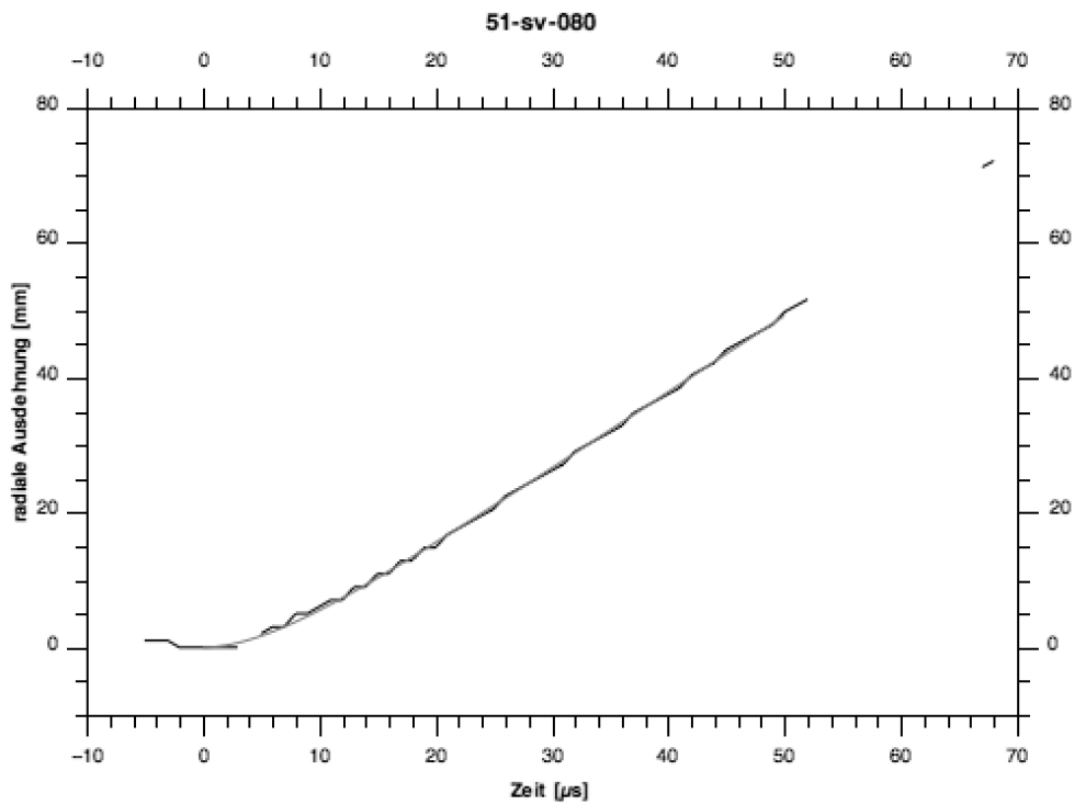


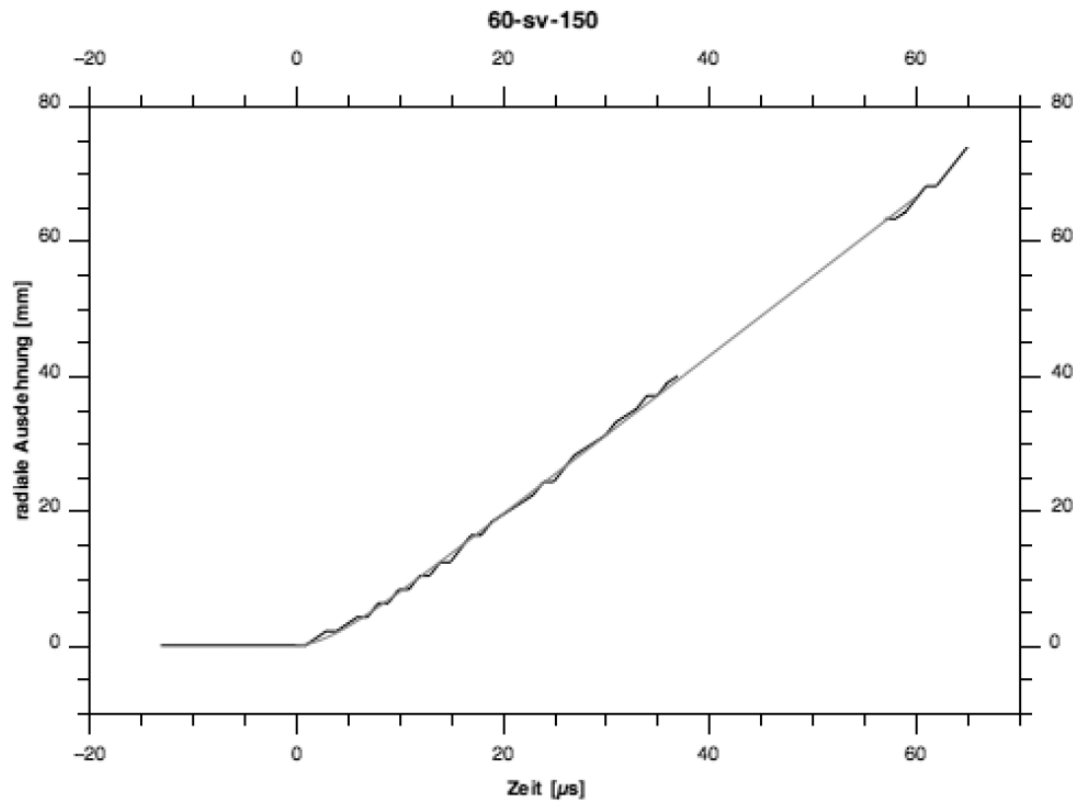
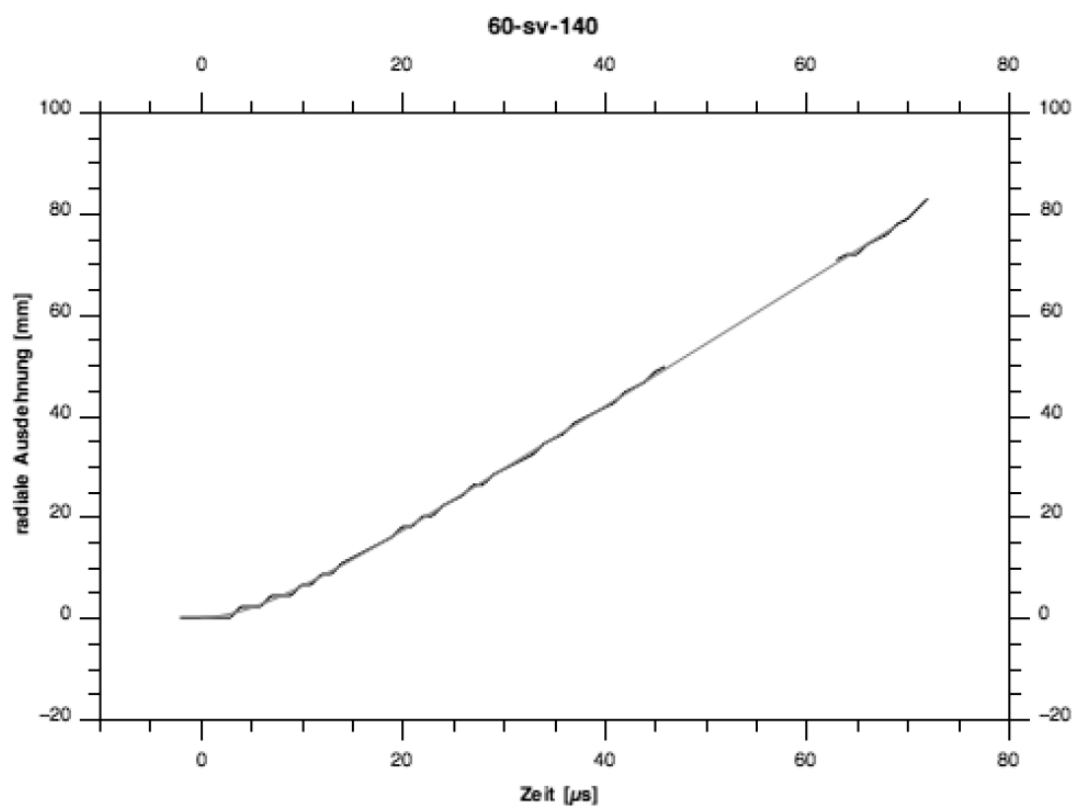
Tabelle 9.7: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von TNT

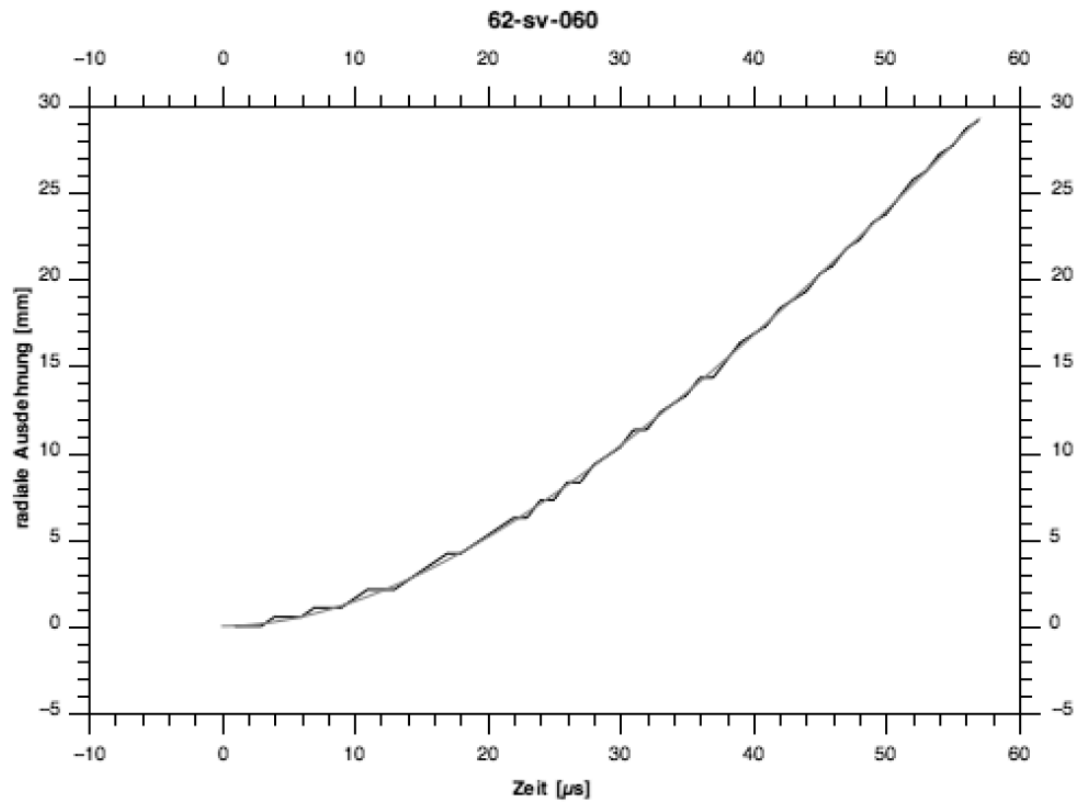
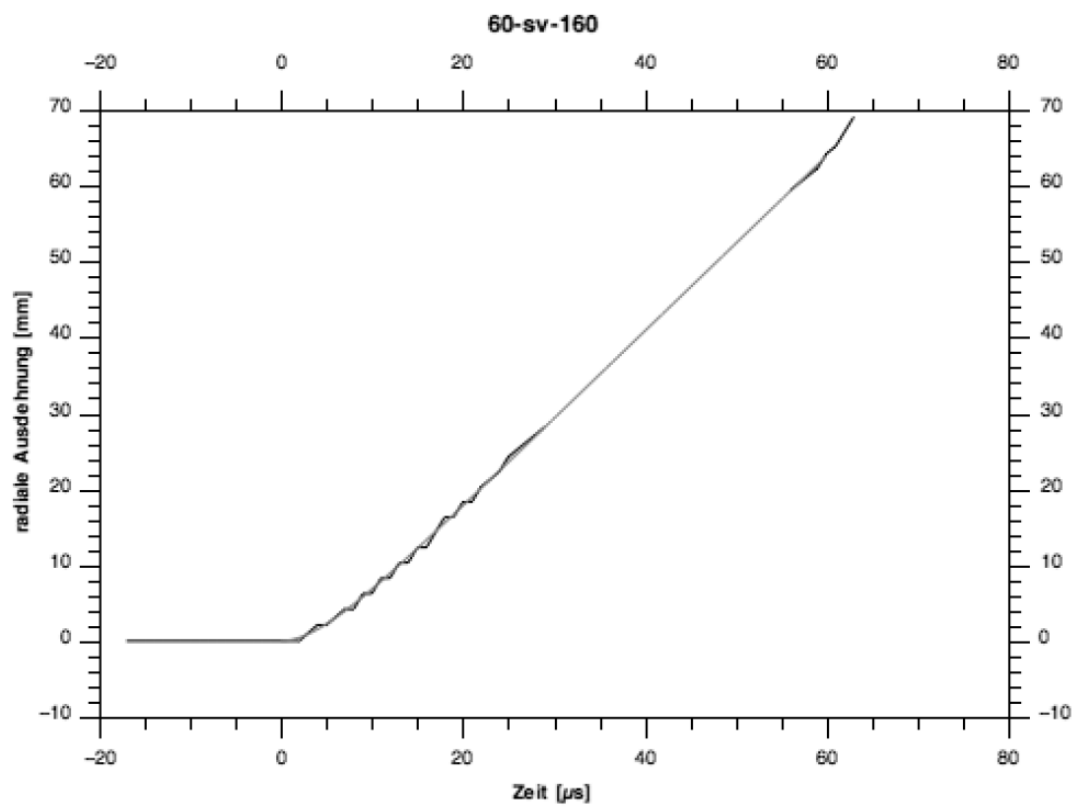
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter	
			$\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$ A_r [mm/μs]	B_r [1/μs]
33	kein Film			
35	sv	80	0.90484	0.09374
		90	0.90116	0.07901
		110	0.90052	0.06597
36	sv	60	0.75804	0.19756
		80	0.74557	0.08235
		100	0.74956	0.18947
39	sv	100	0.80966	0.10388
		110	0.82562	0.09865
		120	0.80823	0.08111
		130	0.81849	0.11024

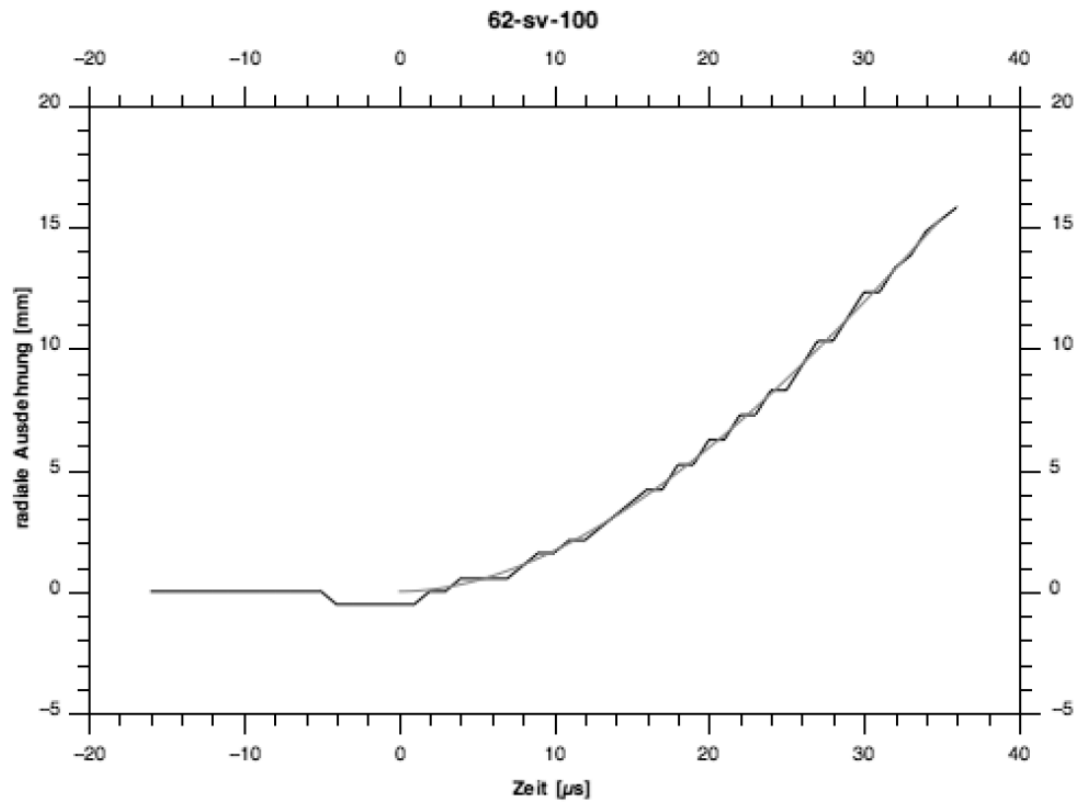
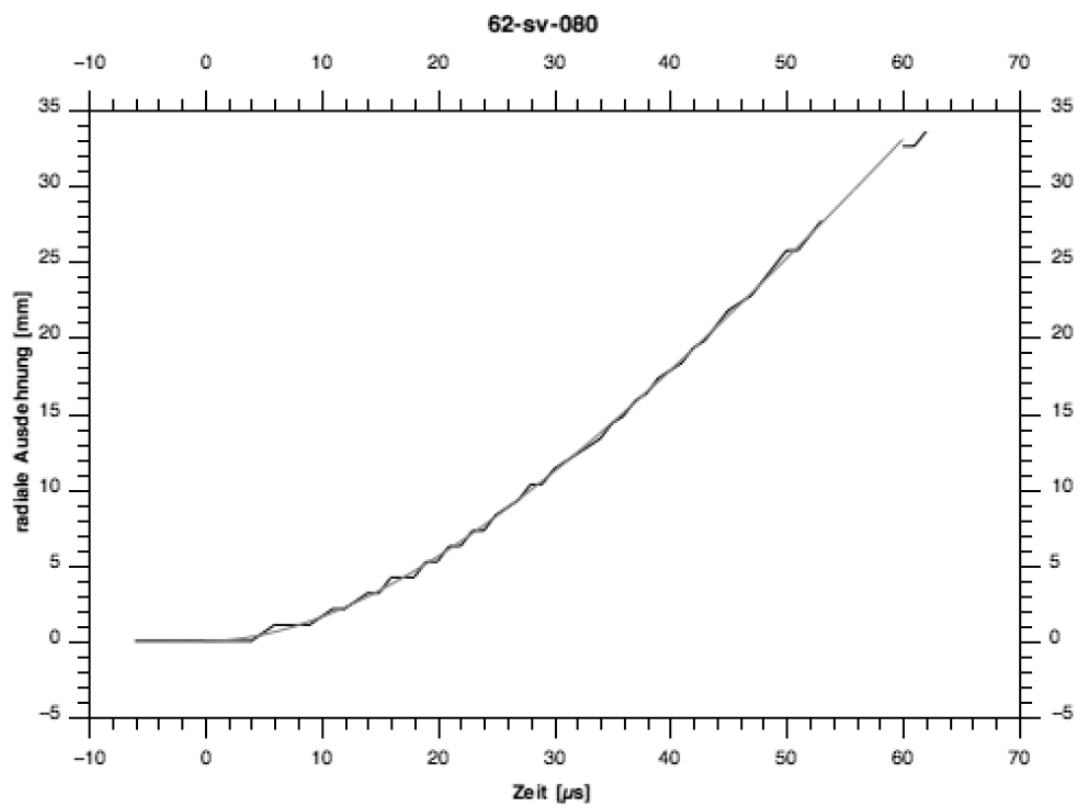
9.2.7. "Supergel 30", Maxam Deutschland GmbH

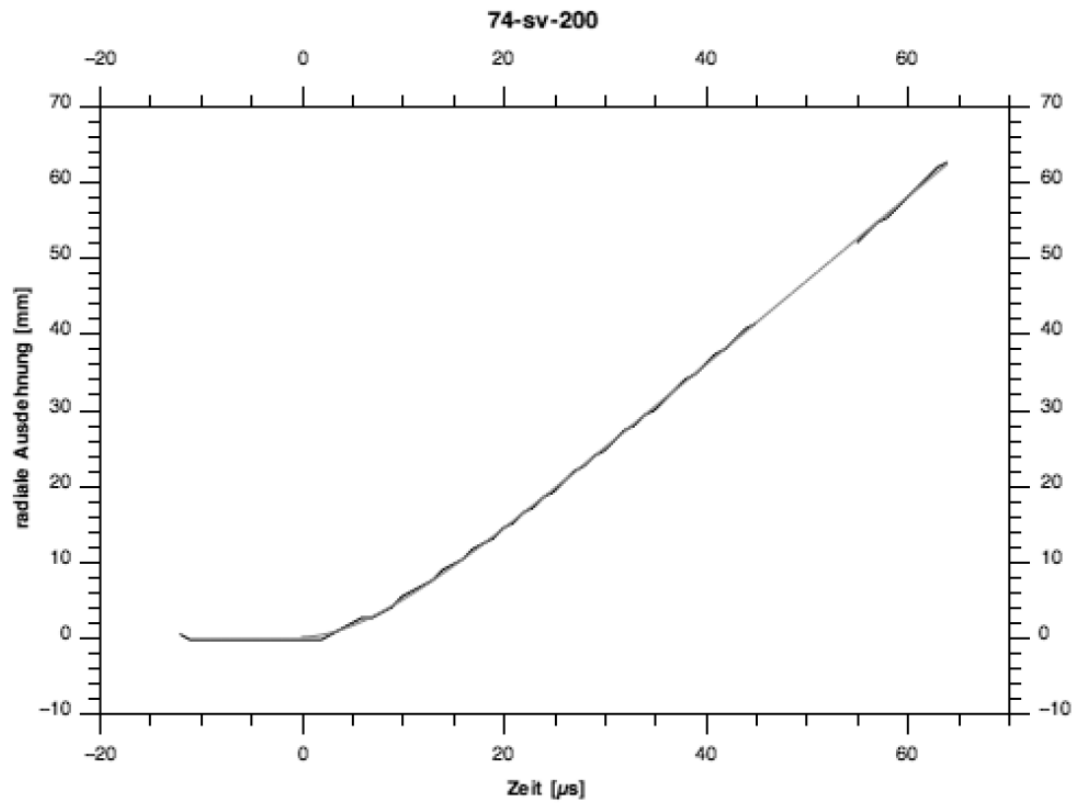
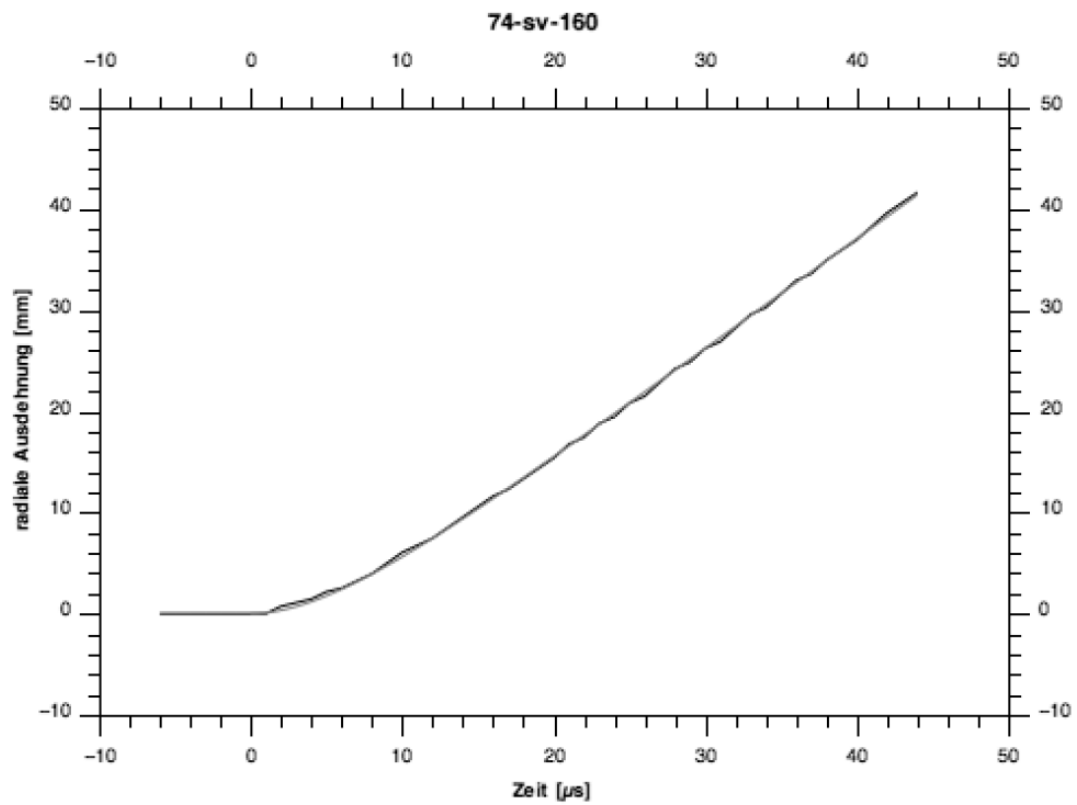


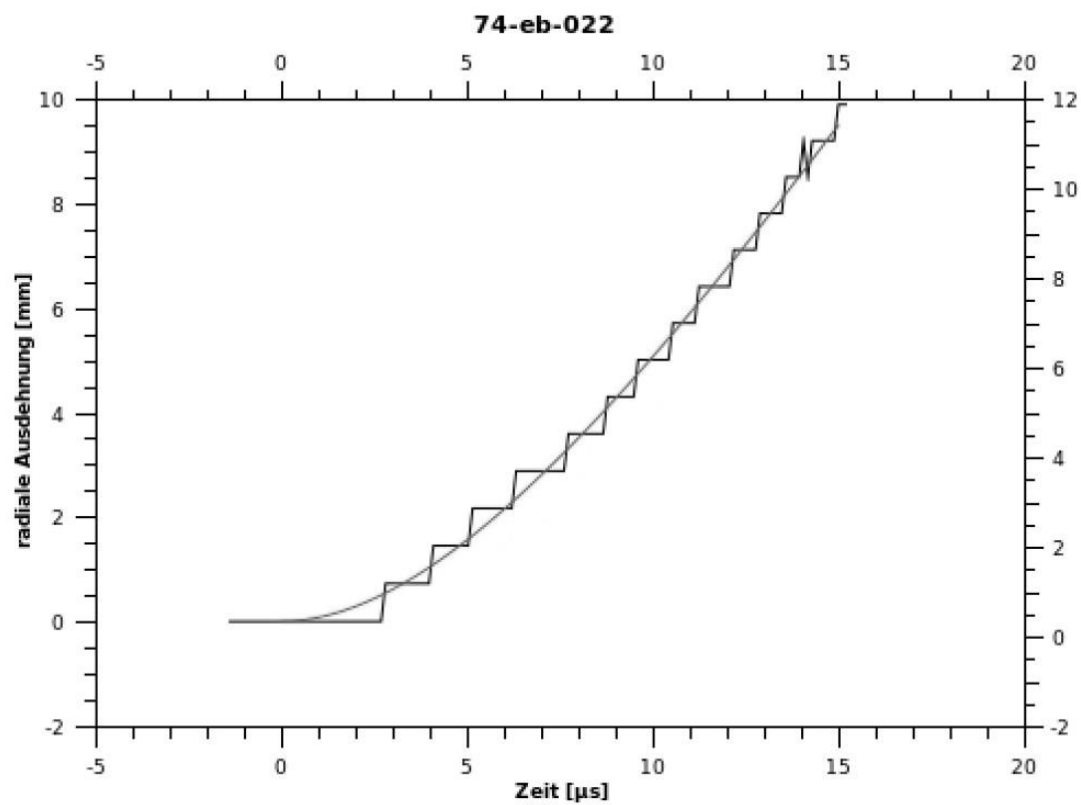
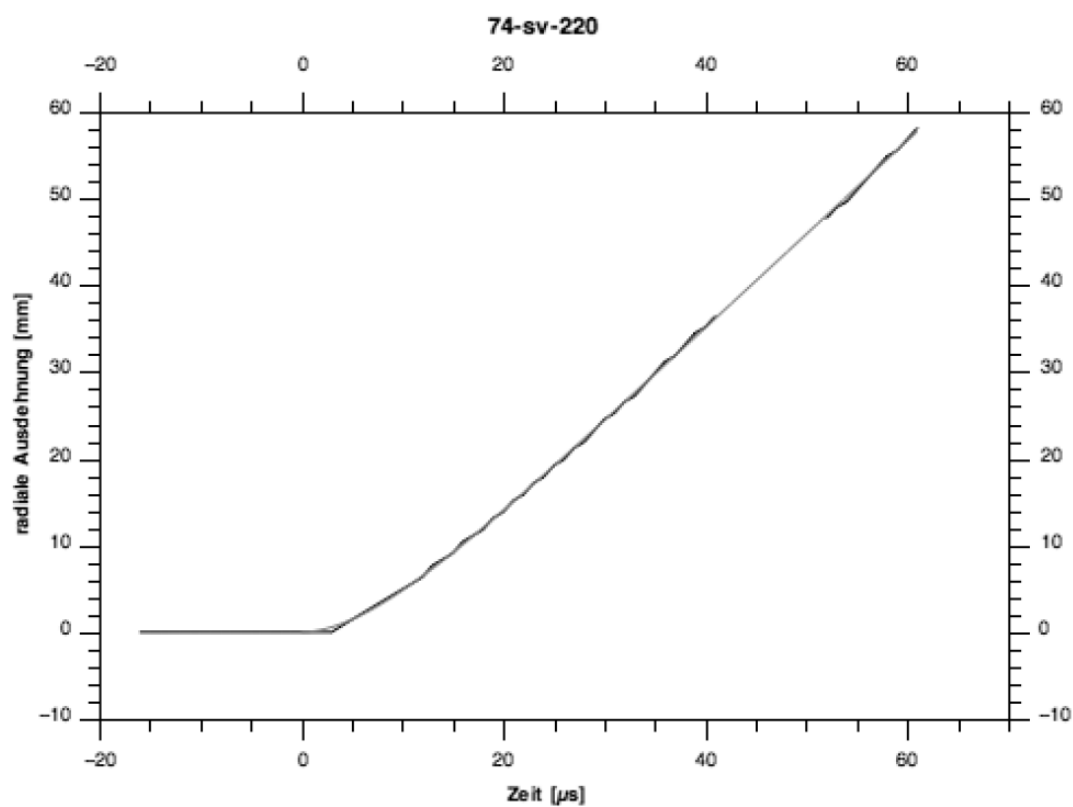


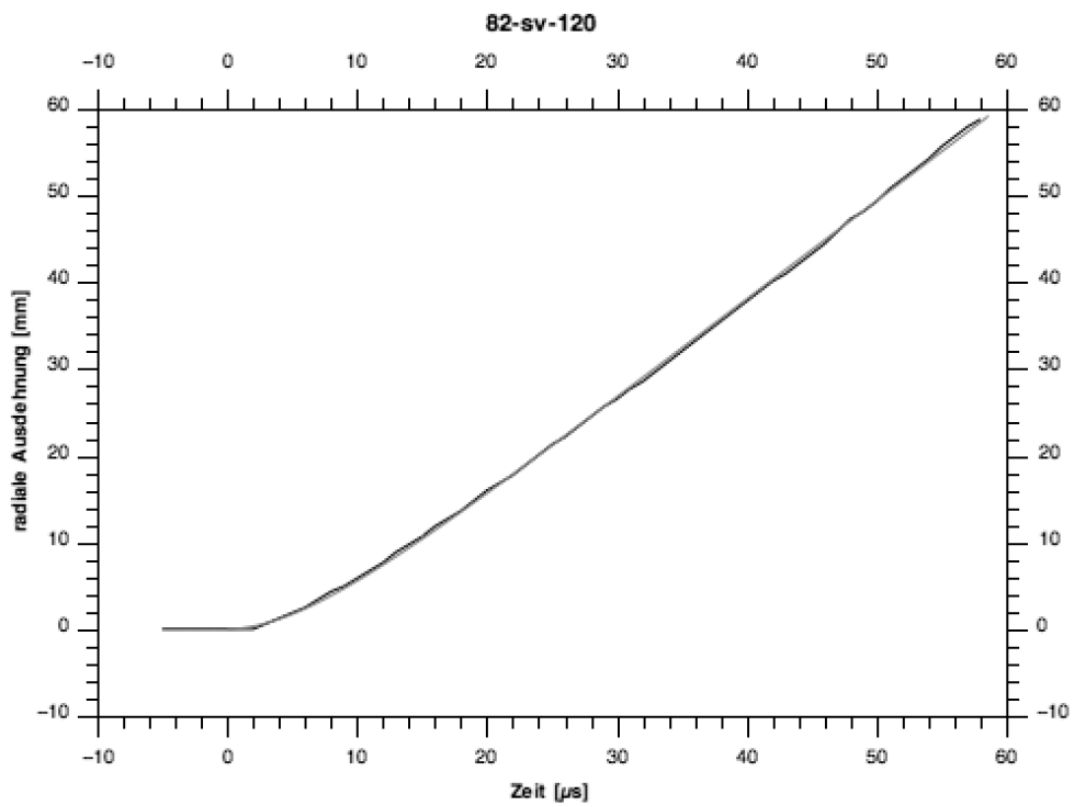
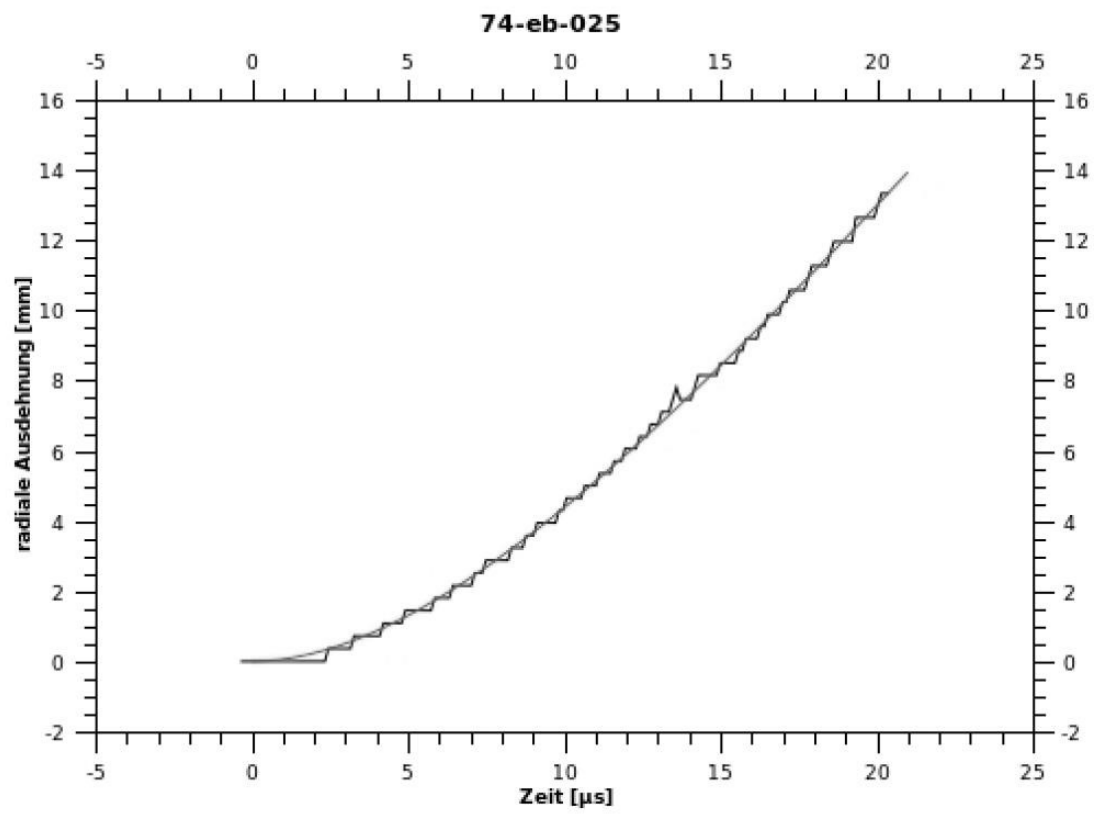


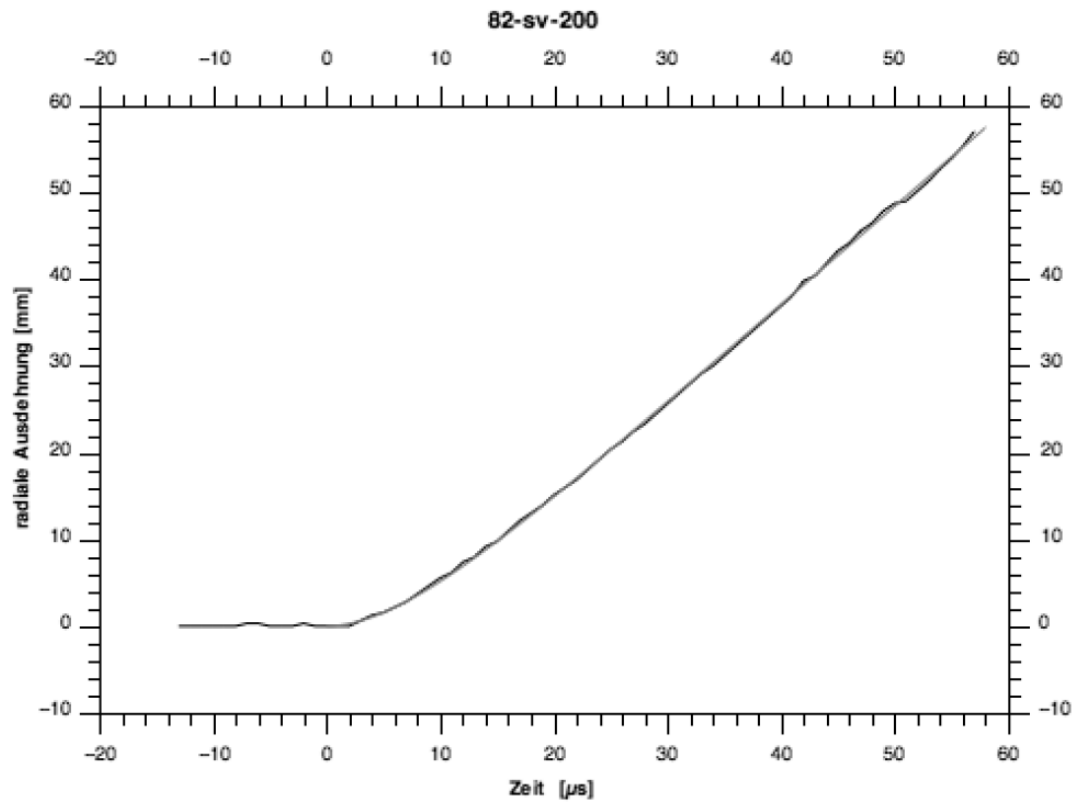
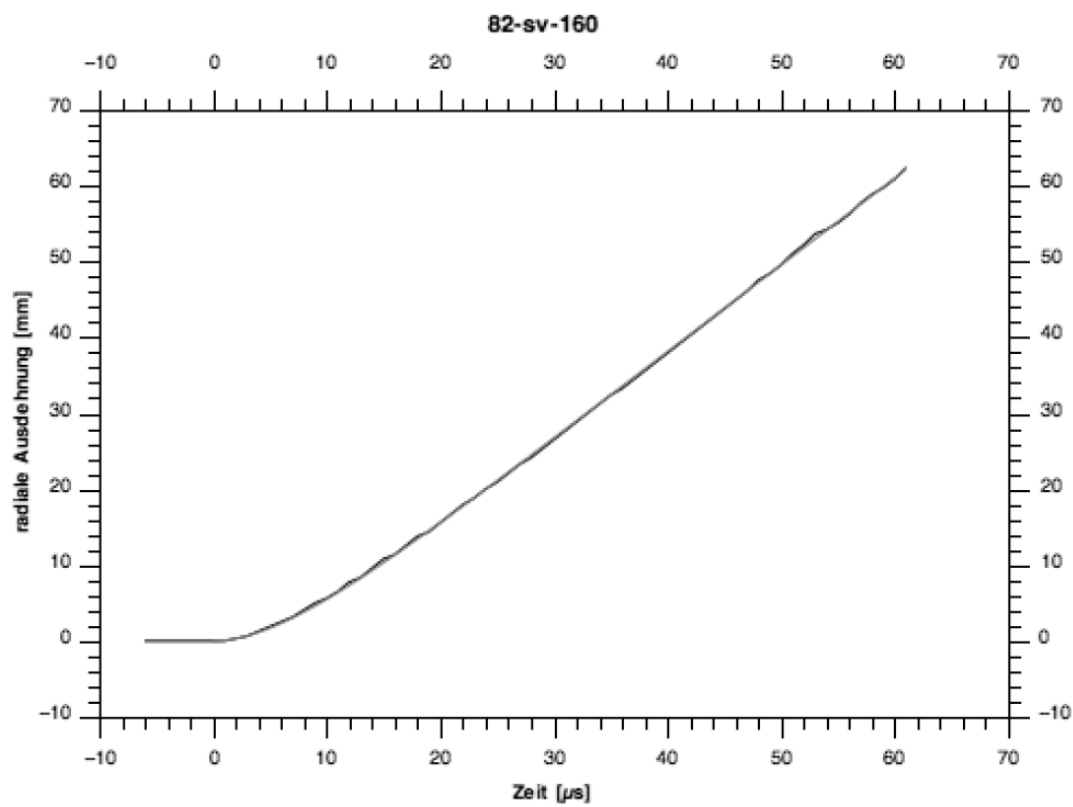


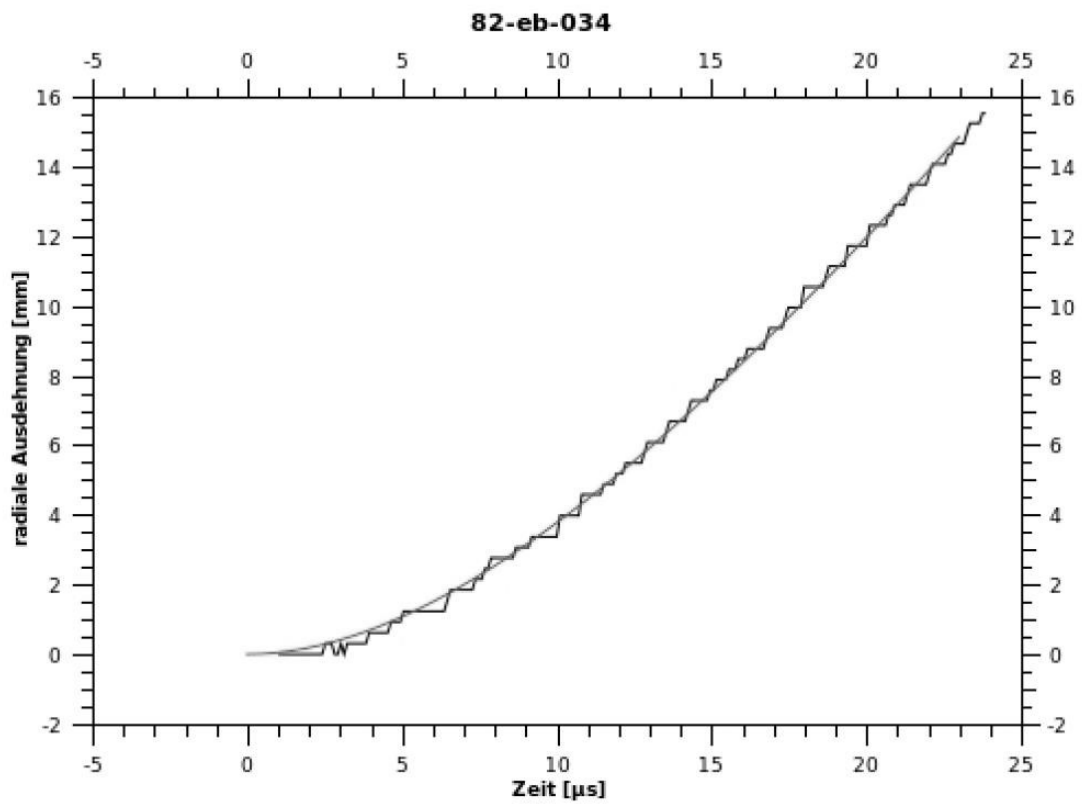
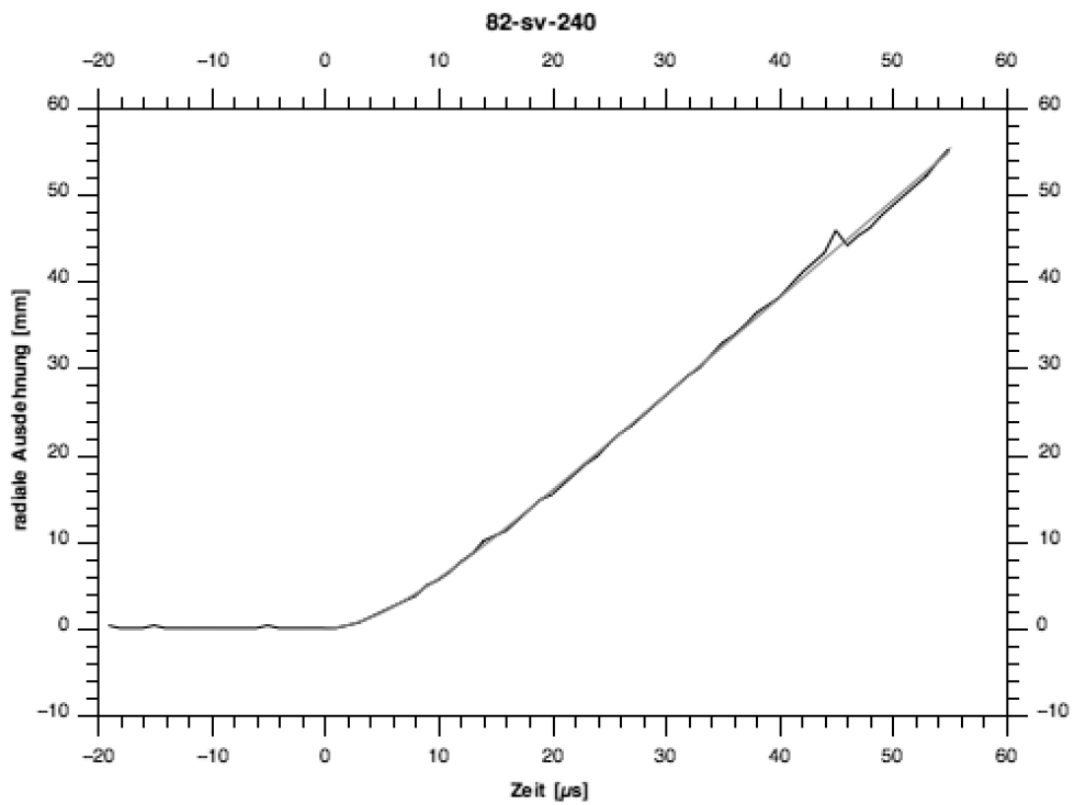


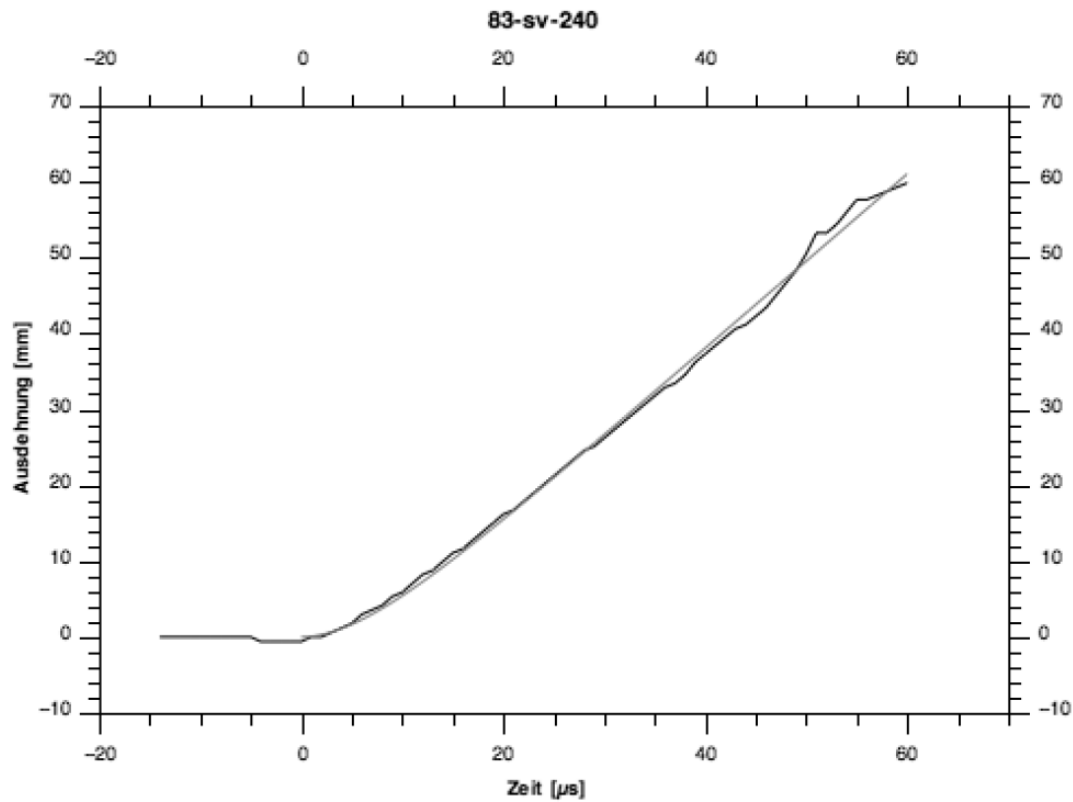
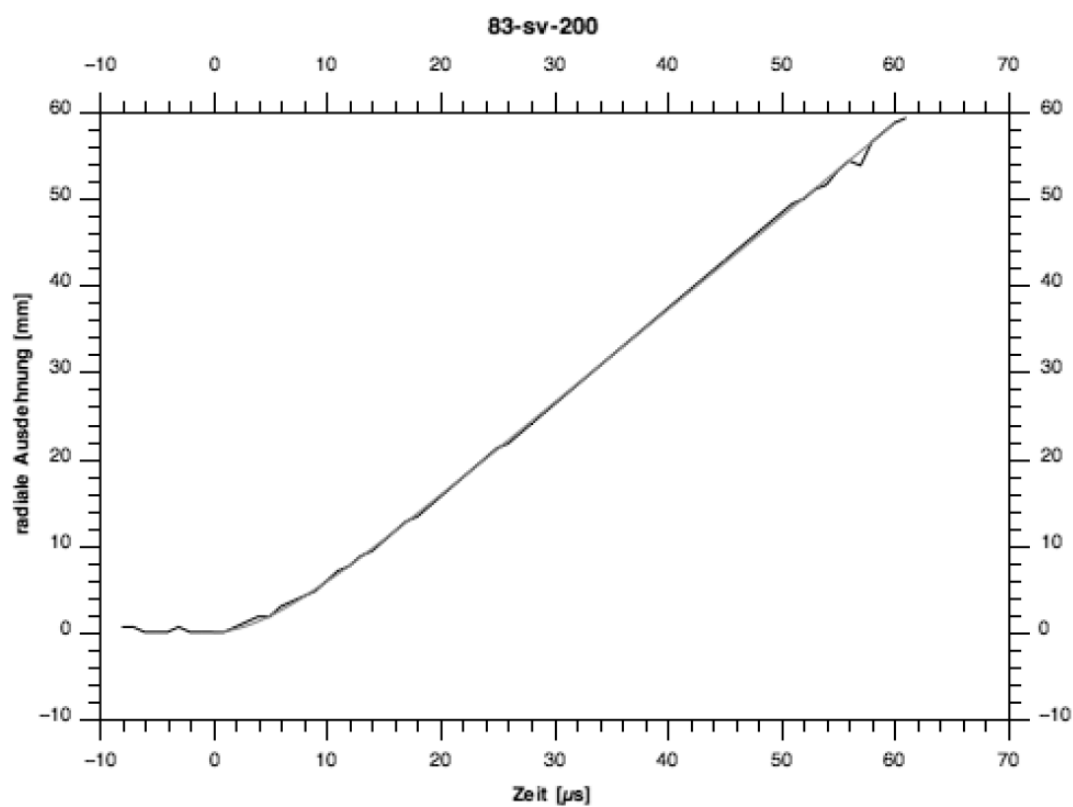












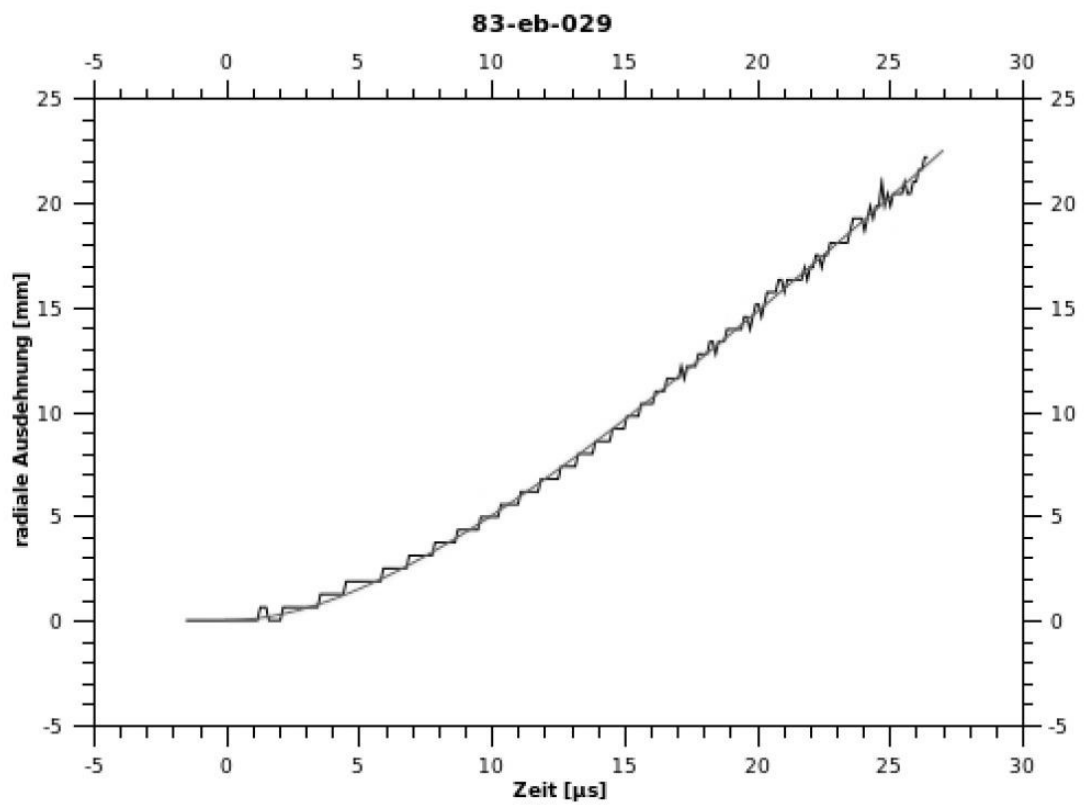
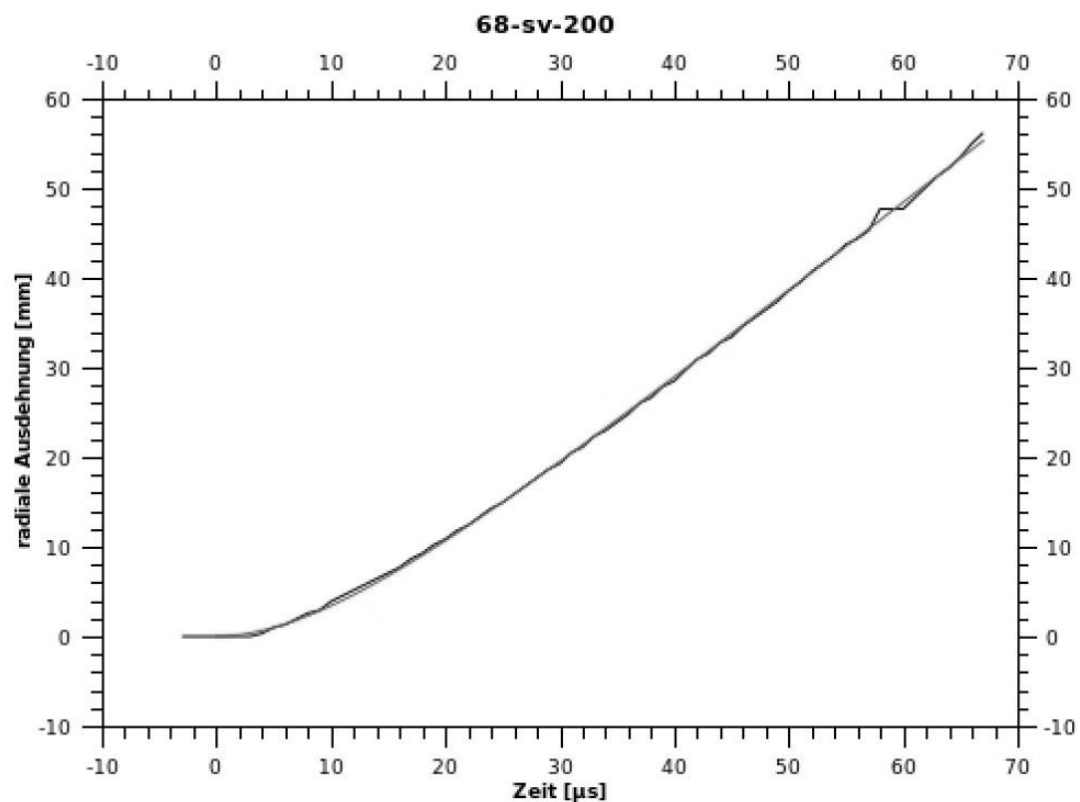
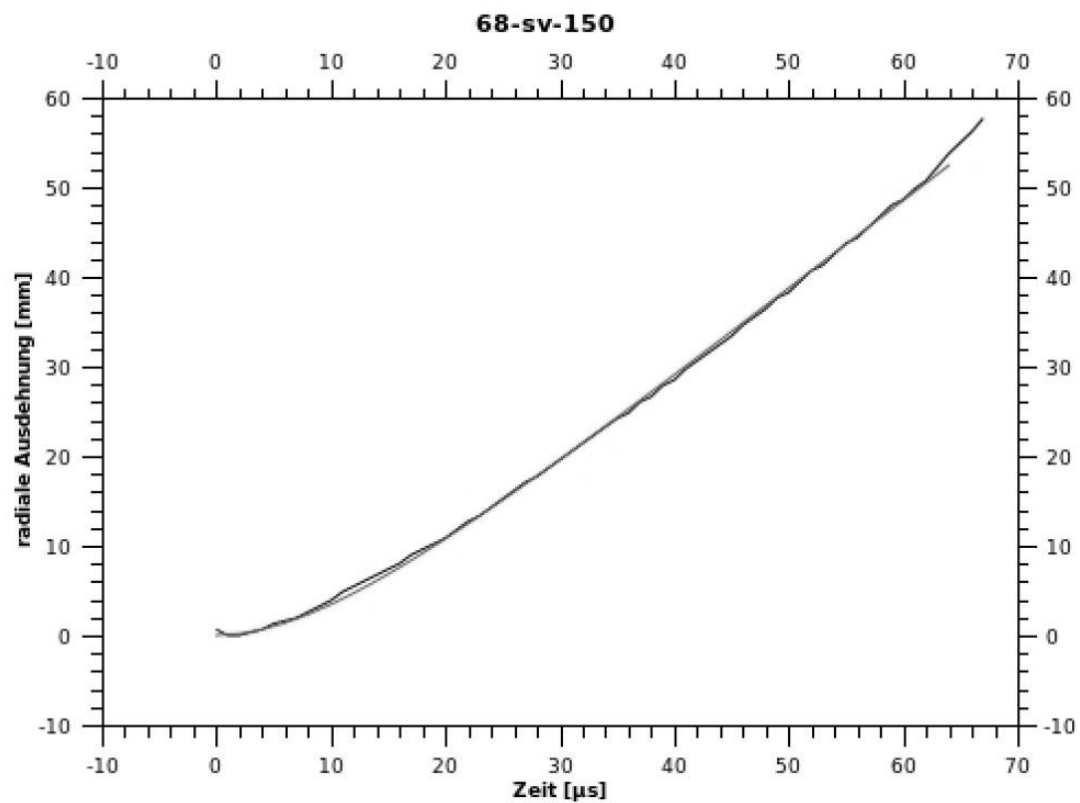


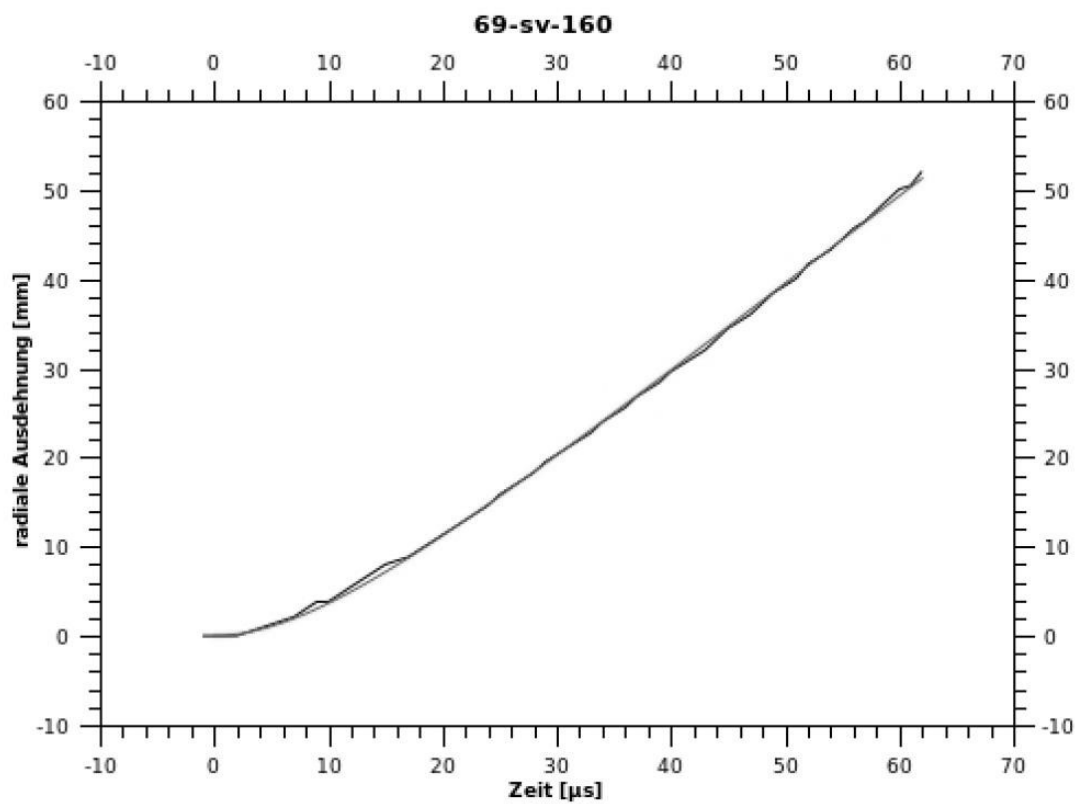
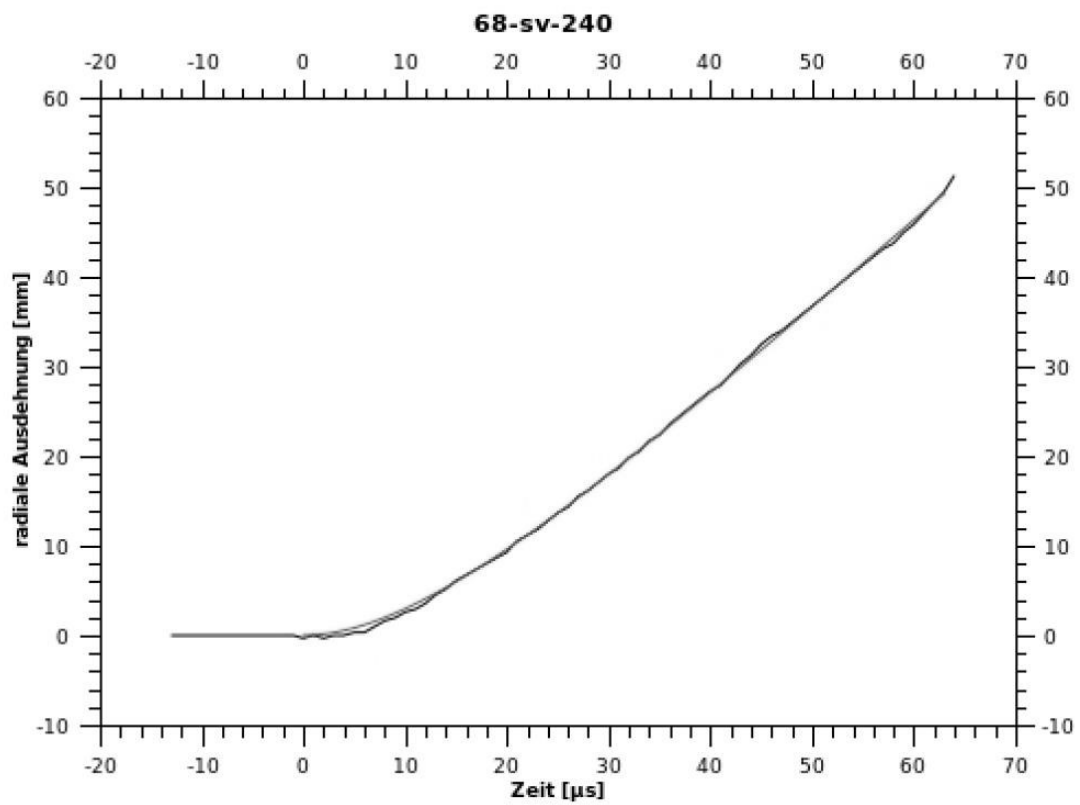
Tabelle 9.8: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests von "Supergel 30"

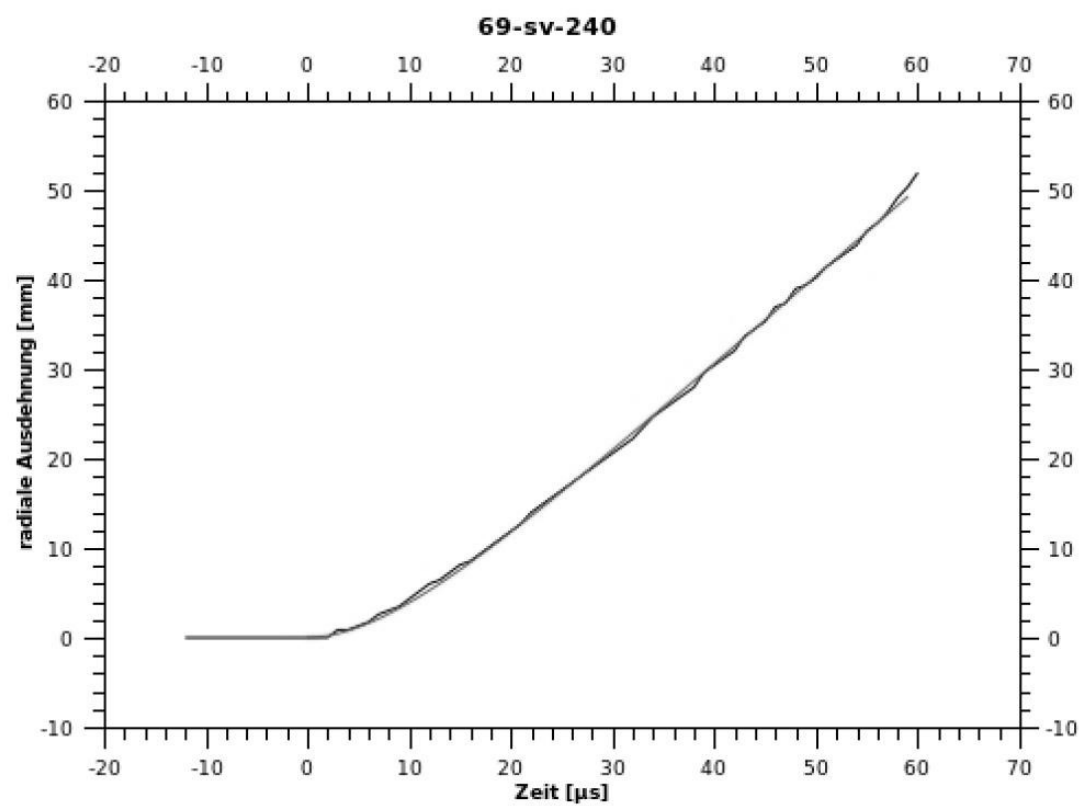
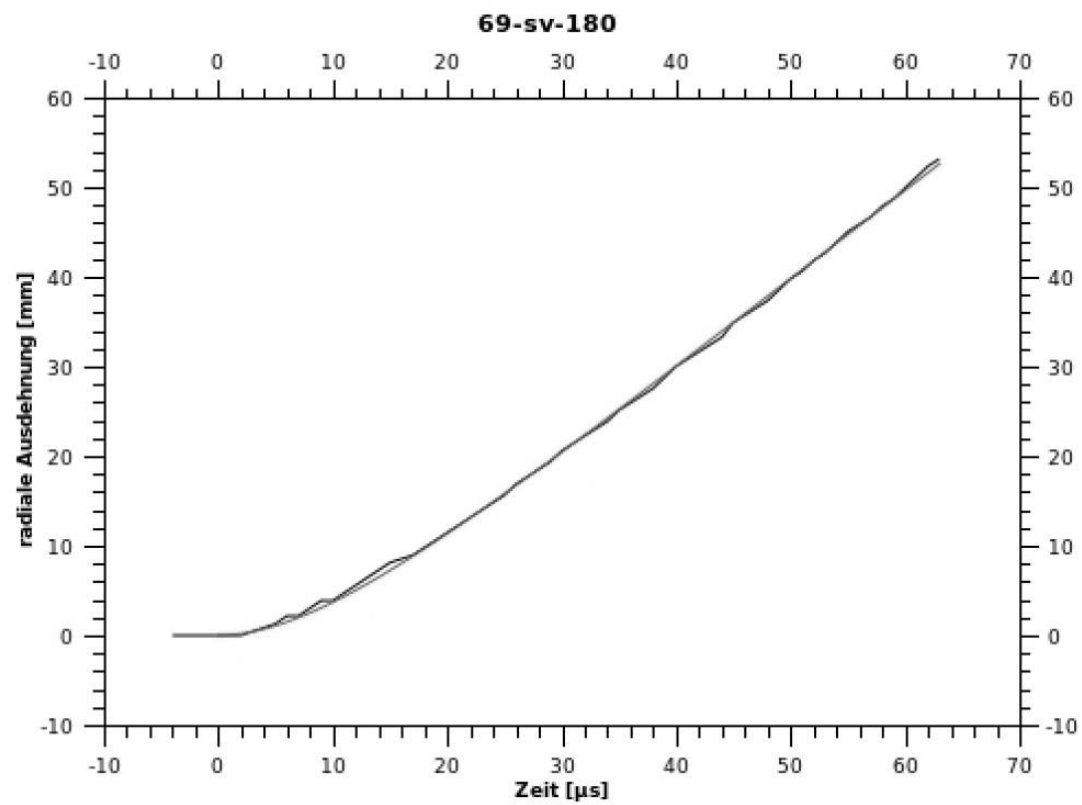
Rohrnr.	Auswertungsform (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter $\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/ μ s]	B_r [1/ μ s]
51	sv	50	0.97035	0.15193
		60	1.05684	0.11605
		80	1.13368	0.15104
52	kein Film			
53	kein Film			
57	kein Film			
60	sv	120	1.15912	0.14883
		140	1.23774	0.15746
		150	1.17651	0.28087
		160	1.15324	0.21754
62		60	0.89880	0.03559
		80	0.89780	0.03933
		100	0.96172	0.03935
74	sv	160	1.08742	0.16890
		200	1.10833	0.12978
		220	1.08094	0.13226
	eb	022	1.05512	0.14856
		025	1.03939	0.12141
82	sv	120	1.13475	0.15408
		160	1.14471	0.14882
		200	1.13422	0.13669
		240	1.14311	0.15262
	eb	034	1.13714	0.08681

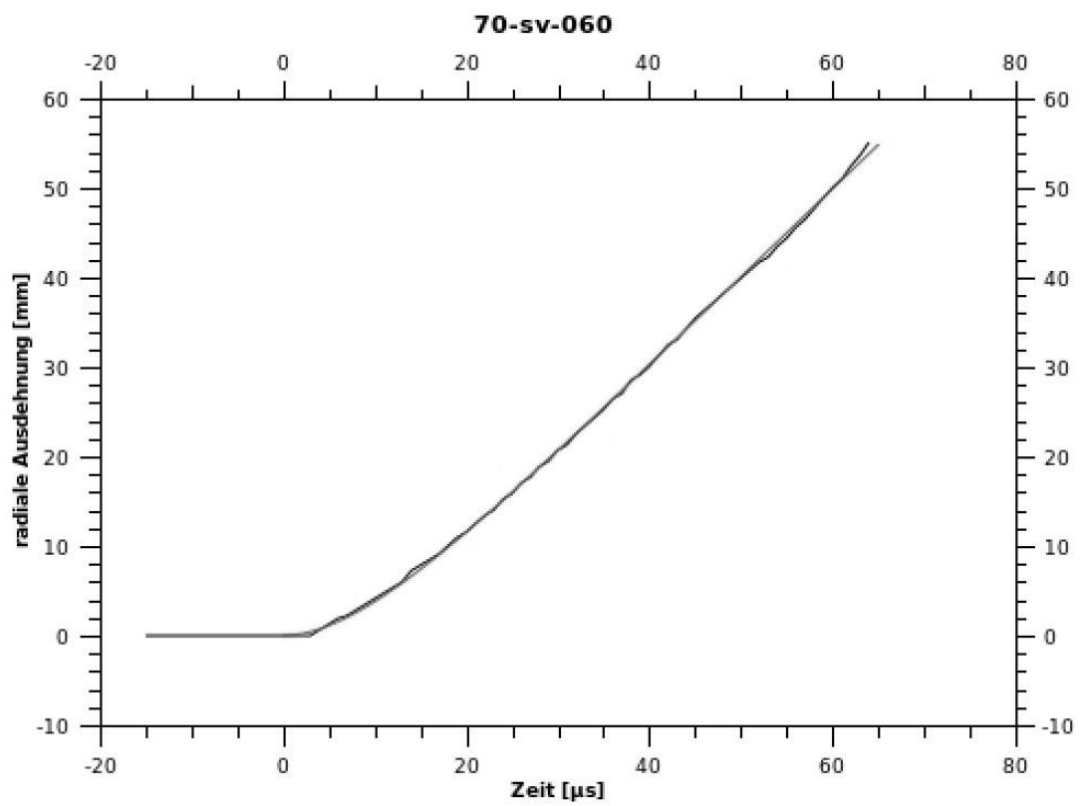
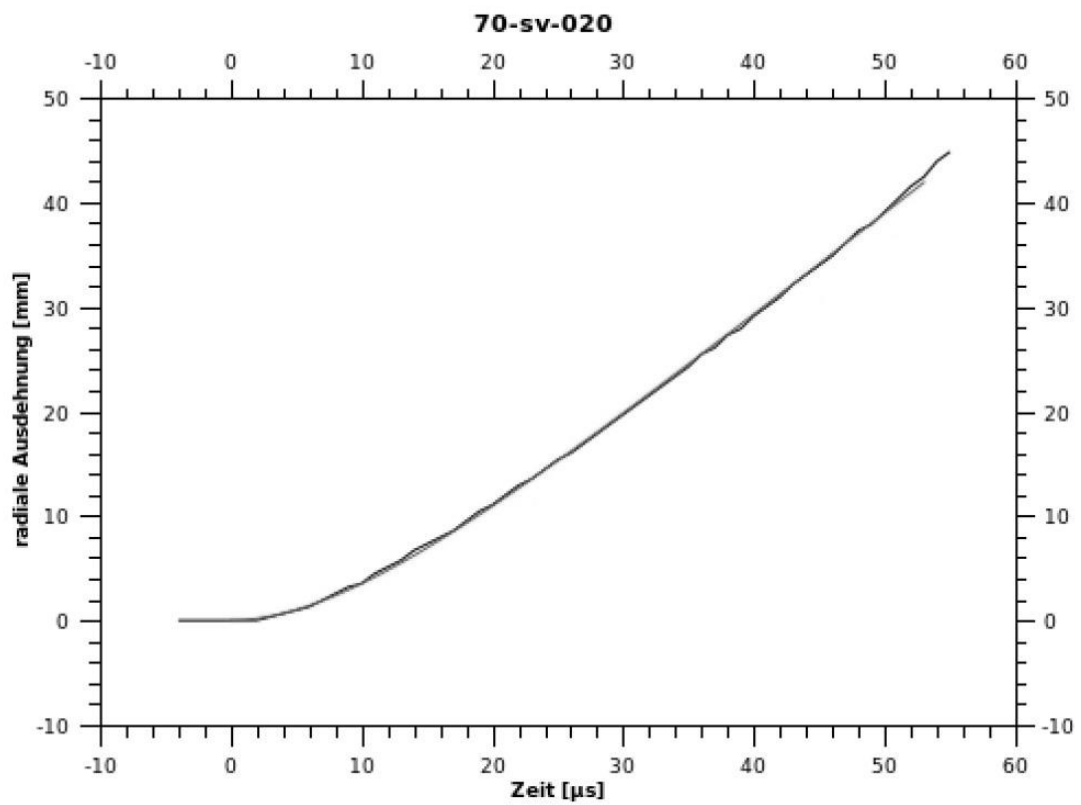
Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter $\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/μs]	B_r [1/μs]
83	sv	200	1.07686	0.18139
		240	1.08773	0.17866
	eb	029	1.16382	0.12521

9.2.8. "Testsprengstoff", MBDA-TDW









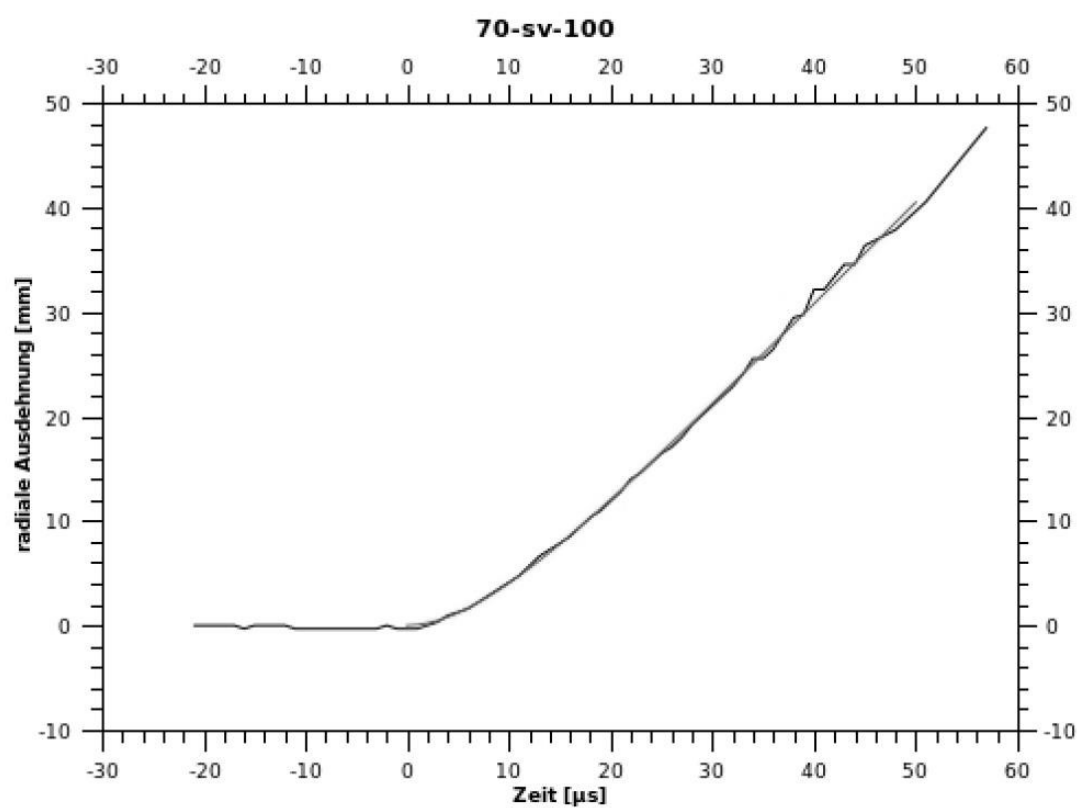


Tabelle 9.9: Fitting-Parameter A_r und B_r der Zylindertests des Testsprengstoffes

Rohrnr.	Auswertungs- form (sv / eb)	Zeilennr./ Bildnr.	Fitting - Parameter $\Delta r_m = A_r \cdot \left(t - \frac{1}{B_r} \cdot (1 - e^{-B_r \cdot t}) \right)$	
			A_r [mm/ μ s]	B_r [1/ μ s]
68	sv	150	0.98284	0.09357
		200	0.98526	0.09156
		240	0.98532	0.07625
69	sv	160	0.98367	0.10098
		180	0.98772	0.10243
		240	0.98478	0.11076
70	sv	020	0.98099	0.09646
		060	0.98584	0.10613
		100	0.97181	0.11885

9.3. Selbstverfasste Skripte und Programme zur Erfassung der Zylindertestdaten

9.3.1. Skript zur Generierung von Streakbildern aus den Einzelbildern eines Filmes

Folgendes Skript dient der Generierung von Streakbildern aus den Einzelbildern eines Filmes. Dazu werden in den Einzelbildern eine vorher bestimmte Zeile extrahiert und diese Zeilen zu einer neuen Bilddatei zusammengefügt. Das Skript ist zur Benutzung unter Linux (UBUNTU 10.04.03) konzipiert.

```
#!/bin/bash
```

```
# 1. parameter: Verzeichnis mit Bildern
```

```
# 2. Parameter: Ausgabedateiname (mit Endung .tif)
```

```
# 3. Parameter: Bildbreite
```

```
# 4. Parameter: gewünschte Zeile
```

```
cd "$1"
```

```
FILES=`ls -1 *.tif`
```

```
if [ -e tempstreak ]; then
```

```
    rm tempstreak
```

```
fi
```

```
k=0
```

```
for f in $FILES; do
```

```
    convert $f -crop $3x1+0+$4 -format gray -depth 8 gray:temp
```

```
    cat temp >> tempstreak
```

```
    k=$(( $k+1 ))
```

```
done
```

```
echo "$k Bilder ausgewertet"
```

```
convert -size $3x$k -depth 8 gray:tempstreak tif:$2
```

```
if [ -e tempstreak ]; then
    rm tempstreak temp
fi
if [ -e temp ]; then
    rm temp
fi
mv $2 $HOME
```

9.3.2. Programm zur Bestimmung der seitlichen (radialen) Ausdehnung der Zylinderwand

Dieses einfache C+-Programm liest ein gegebenes Bild und bestimmt Zeile für Zeile die seitliche Ausdehnung, ausgehend von der Bildmitte. Dazu ist es notwendig, das Bild ggf. so zu beschneiden, dass die Mitte des Bildes innerhalb des Rohres liegt. Dieses Programm wurde unter Linux (Ubuntu 10.04.03) geschrieben und konvertiert. Überprüft wurde das Programm mit mehreren erstellten Bildern sowie durch Ausmessung der radialen Ausdehnung einzelner Streakansichten mit Hilfe des Messwerkzeuges eines Bildbearbeitungsprogrammes.

```
#include <stdlib.h>          /* required for the call to exit () */
#include <stdio.h>
#include <fcntl.h>
#define MAXWID  4048
main (argc, argv)
    int          argc;
    char  *argv[];
{
    FILE          *fp, *fopen ();
    int           fdin, wid, lin, i;
```

```

    int                mp, absmin, absmax, zeile;
int    daten[MAXWID];
int    min, max, minpos, maxpos, mittel;
int    min2, max2, minpos2, maxpos2, mittel2;
int    edge1, edge2;
unsigned char    buf[MAXWID];
if (argc != 4)
    exit (printf ("Eingabedateinamen, Breite und
Ausgabedateinamen in der Kommandozeile angeben!\n"));

sscanf (argv[2], "%d", &wid);
if (wid > MAXWID)
    exit (printf ("Bildbreite zu gross!\n"));

if ((fdin = open (argv[1], O_RDONLY)) < 0)
    exit (printf ("... Datei nicht lesbar!\n"));

printf ("Oeffne Ausgabedatei %s ...\n", argv[3]);
if ((fp = fopen (argv[3], "w")) == NULL)
    exit (printf ("... Datei kann nicht geöffnnet werden!\n"));

zeile = 0;
while (read (fdin, buf, wid) == wid)
{
    for (i = 0; i < wid; i++)
        daten[i] = (int) buf[i];

    mp = wid/2;

    absmax = 0;
    absmin = 255;
    for (i = 0; i < wid; i++)
    {
        if (daten[i] >= absmax)

```

```
    absmax = daten[i];  
    if (daten[i] <= absmin)  
        absmin = daten[i];  
}
```

```
max = 0;  
min = 255;
```

```
i = mp;  
while (i > 0)
```

```
{  
    if (daten[i] > max)           // Suche des Max.  
        max = daten[i];  
    if (daten[i] <= min)         // Suche des Min.  
        min = daten[i];  
    if ((100*daten[i] < 95*max)  // Abbruch bei Rückfall auf  
95% von Max  
        && (2*daten[i] > absmax)) // aber erst bei über 50%  
Absmax
```

```
        i = -1;  
    i--;  
}
```

```
i = mp;  
while (daten[i] < max)  
    i--;  
maxpos = i;
```

```
mittel = (max - min)/2;  
i = maxpos;  
while (daten[i] > mittel)  
    i++;  
edge1 = i;
```

```

    max2 = 0;
    min2 = 255;

    i = mp;
    while (i < wid)
    {
        if (daten[i] > max2)
            max2 = daten[i];
        if (daten[i] <= min2)
            min2 = daten[i];
        if ((100*daten[i] < 95*max2) // Abbruch bei Rückfall auf
95% von Max2
            && (2*daten[i] > absmax)) // aber erst bei über 50%
Absmax
            i = wid+1;
        i++;
    }

    i = mp;
    while (daten[i] < max2)
        i++;
    maxpos2 = i;

    mittel2 = (max2 - min2)/2;
    i = maxpos2;
    while (daten[i] > mittel2)
        i--;
    edge2 = i;

    printf ("%3d: %3d, %3d\n", zeile++, edge1, edge2);*/

    fprintf (fp, "%3d %3d %3d \n", zeile++, edge1, edge2);
    }
    close (fdin);
    fclose (fp); }

```